

VŠB – Technická Univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra energetiky

Analýza projektů jaderných bloků pro
dostavbu Temelína

Analyses of Nuclear Power Units
Projects for Temelin

Student: Ondřej Palička

Vedoucí bakalářské práce: prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.

Ostrava 2013

Zadání bakalářské práce

Student:

Ondřej Palička

Studijní program:

B2341 Strojírenství

Studijní obor:

3907R009 Provoz energetických zařízení

Téma:

Analýza projektů jaderných bloků pro dostavbu Temelína
Analyses of Nuclear Power Units Projects for Temelin

Zásady pro vypracování:

Na základě studia literatury proveďte analýzu projektů jaderných bloků zúčastněných v tendru na dostavbu jaderné elektrárny Temelín. Popište primární a sekundární okruhy, typy jaderných energetických reaktorů, parních generátorů jaderných elektráren a turbín a dalších strojních zařízeních, pasivní a aktivní bezpečnostní systémy.

Z parametrů II. okruhu jaderných energetických bloků: francouzského EPR-European Pressurized Reaktor, amerického AP 1000 Westinghouse a ruského MIR 1200 vypočítejte účinnost bloku a proveďte jejich vzájemné porovnání.

Seznam doporučené odborné literatury:

HEJZLAR, Radko. *Stroje a zařízení jaderných elektráren*. Díl 1 a 2. Vydavatelství ČVUT v Praze, 2005. ISBN 80-01-03190-X.

MÁTAL, Oldřich. *Jaderné reaktory a jejich chlazení*. Nakladatelství CERN VUT v Brně, 2001. ISBN 80-214-2028-6.

HEZOUČKÝ, František. *Základy teorie provozních režimů jaderných elektráren s tlakovodními reaktory*. Vydavatelství ČVUT v Praze, 2005. ISBN 80-01-03324-4.

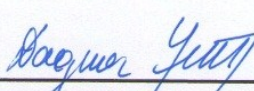
Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

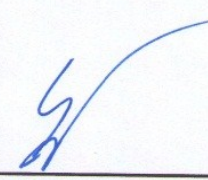
Vedoucí bakalářské práce: **prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.**

Datum zadání: 14.12.2012

Datum odevzdání: 20.05.2013



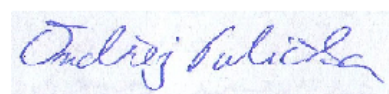

prof. Ing. Dagmar Juchelková, Ph.D.
vedoucí katedry


doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 20.5.2013

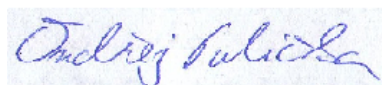
A handwritten signature in blue ink, reading "Ondřej Bulich", written over a dotted line.

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на вѣдомі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo - bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do její skutečné výše).
- беру на вѣдомі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 20.5.2013



.....
podpis studenta

Jméno a příjmení autora práce: Ondřej Palička

Adresa trvalého pobytu autora práce: Sládkova 2988/27a 70200 Ostrava

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

PALIČKA, O. *Analýza projektů jaderných bloků pro dostavbu Temelína, bakalářská práce*. Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, Katedra energetiky, 2013, 70 s. Vedoucí práce: prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.

Podstatou této bakalářské práce je seznámení s jadernými reaktory generace III uvažovaných pro dostavbu 3. a 4. jaderného bloku v jaderné elektrárně Temelín. Popis principů činnosti a konstrukce vybraných typů jaderných reaktorů a jejich aktivních a pasivních bezpečnostních systémů. Dalším bodem je zhodnocení těchto projektů a jejich vzájemné porovnání. V práci je uveden zjednodušený výpočet účinnosti jaderných bloků pro danou modelovou koncepci.

Klíčová slova: Temelín, MIR 1200, Westinghouse AP1000

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

PALIČKA, O. *Analyses of Nuclear Power Units Projects for Temelin Bachelor Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Energy, 2013, 70 p. Thesis head: prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.

The aim of the bachelor thesis is a familiarization with third generation of nuclear reactors for the completion of the third and fourth nuclear reactor at the nuclear power plant in Temelín, description of the operation principles and construction of selected types of nuclear reactors and their active and passive safety systems. Furthermore the thesis discusses the assessment and comparison of these projects. In the thesis there is a calculation of the efficiency of nuclear reactors for the model example.

Key words: Temlin, MIR 1200, Westinghouse AP1000

Obsah

Seznam použitých veličin.....	8
Úvod.....	11
1 Jaderná elektrárna Temelín a jeho dostavba	12
1.1 Technické parametry JE Temelín [1]	13
2 Jaderná elektrárna MIR 1200	16
2.1 Primární okruh.....	19
2.1.1 Reaktor VVER-1200/V-491	19
2.1.2 Parogenerátor	23
2.1.3 Kompensátor objemu	25
2.1.4 Hlavní cirkulační čerpadlo	26
2.2 Bezpečnostní systémy.....	27
2.2.1 Pasivní bezpečnostní systémy	28
2.2.2 Aktivní bezpečnostní systémy.....	30
2.3 Sekundární okruh.....	31
3 Jaderná elektrárna Westinghouse AP1000.....	33
3.1 Primární okruh.....	38
3.1.1 Parogenerátor DELTA 125	38
3.2 Kompensátor objemu	40
3.2.1 Hlavní cirkulační čerpadlo	40
3.3 Bezpečnostní systémy.....	42
3.3.1 Aktivní bezpečnostní systémy.....	42
3.3.2 Pasivní bezpečnostní systémy	42

4	Výpočet	46
4.1	Výpočet účinnosti bloku projektu MIR1200	46
4.2	Výpočet účinnosti projektu Westinghouse AP1000:	58
5	Závěr	61
5.1	Zhodnocení projektu MIR 1200	61
5.2	Zhodnocení projektu AP1000 Westinghouse	62
6	Literatura	67
	Seznam obrázků	69
	Seznam tabulek	70

Seznam použitých veličin

Značka	Veličina	Jednotka
n	Otáčky	ot/min
p_n	Výtlačný tlak napájecího čerpadla	MPa
p_{pg}	Tlak na výstupu z parogenerátoru	MPa
p_a	Tlak admisní páry na vstupu do VT dílu turbíny	MPa
p_{e1}	Tlak za VT dílem turbíny	MPa
p_{e2}	Tlak za posledním NT dílem turbíny	MPa
p_d	Tlak na vstupu do NT dílu turbíny	MPa
$t_{o1} - t_{o6}$	Teploty sytosti páry	°C
$p_1 - p_6$	Tlak v místech odběru na straně u RO	MPa
$p_{o1} - p_{o6}$	Skutečný tlak v místech odběru na straně RO	MPa
i_s	Entalpie syté páry na straně sacího potrubí čerpadla	$J \cdot kg^{-1}$
i_n	Entalpie kondenzátu za čerpadlem	$J \cdot kg^{-1}$
i_{n-t}	Teoretický nárůst entalpie v čerpadle	$J \cdot kg^{-1}$
i_{n-sk}	Skutečný nárůst entalpie v čerpadle	$J \cdot kg^{-1}$
i_{kx}	Entalpie kondenzátu za napájecím čerpadlem	$J \cdot kg^{-1}$
i_{at}	Entalpie admisní páry před VT dílem turbíny	$J \cdot kg^{-1}$
i_a	Entalpie páry na vstupu do VT dílu turbíny	$J \cdot kg^{-1}$
i_a'	Entalpie páry za přehřívákem	$J \cdot kg^{-1}$
i_{dt}	Entalpie páry před NT dílem turbíny	$J \cdot kg^{-1}$
i_d	Entalpie páry na vstupu do NT dílu turbíny	$J \cdot kg^{-1}$

i_{pg}	Entalpie páry na výstupu z parogenerátoru	$J \cdot kg^{-1}$
i_{e1}	Entalpie páry za posledním VT dílem turbíny	$J \cdot kg^{-1}$
i_{e2t}	Entalpie páry za posledním NT dílem turbíny při dané účinnosti	$J \cdot kg^{-1}$
i_{e2}	Entalpie páry za posledním NT dílem turbíny	$J \cdot kg^{-1}$
i_{nv}	Entalpie napájecí vody	$J \cdot kg^{-1}$
i_{ox}	Entalpie páry v místech odběru	$J \cdot kg^{-1}$
i_x	Entalpie páry vstupující do RO	$J \cdot kg^{-1}$
i_x'	Entalpie páry za ohřívákem pro daný tlak p_x	$J \cdot kg^{-1}$
i_c'	Entalpie vody za chladičem kondenzátu	$J \cdot kg^{-1}$
i_{y2}'	Entalpie odloučené vlhkosti v odlučovači vlhkosti	$J \cdot kg^{-1}$
i_{y3}'	Entalpie odloučené vlhkosti v NT dílu turbíny	$J \cdot kg^{-1}$
i_k'	Entalpie kondenzátu	$J \cdot kg^{-1}$
x_1-x_6	Množství odběrové páry nutné pro provoz RO1-6	1
Q_{mp}	Množství páry pro provoz turbíny	$kg \cdot s^{-1}$
Q_{mox}	Celkové množství páry proudící daným zařízením	$kg \cdot s^{-1}$
y_1	Množství odběrové páry mezi VT a NT dílem	1
y_2	Množství odloučené vlhkosti v odlučovači	1
y_3	Poměrné množství odloučené vlhkosti z NT dílu turbíny	1
w_i	Práce 1kg páry	$J \cdot kg^{-1}$
P_i	Vnitřní výkon turbíny	W
P_{sv}	Elektrický výkon na svorkách generátoru	W

P	Čistý výkon	W
P_t	Výkon turbíny	W
η_{tsv}	Tepelná účinnost oběhu	1
η_{tc}	Celková účinnost	1
η_n	Čistá účinnost	1
η_{te}	Tepelná účinnost	1
η_{pg}	Účinnost parního generátoru	1

Zkratka	Veličina
NT	Nízkotlaký díl turbíny
VT	Vysokotlaký díl turbíny
RO	Regenerační ohřívák

Úvod

Pro dostavbu jaderné elektrárny Temelín přichází v úvahu několik variant nejmodernějších tlakovodních reaktorů moderovaných lehkou vodou (PWR). Jedná se o projekty tzv. III. a III.+ generace. Důvody pro volbu PWR byly především:

- světová rozšířenost tlakovodních elektráren – tvoří téměř 60 % provozovaných jaderných elektráren ve světě,
- 50 lety provozu vyzkoušené a v návaznosti na současné bezpečnostní standardy zdokonalené projekty tzv. III. a III.+ generace,
- probíhající výstavba těchto projektů v Evropě i jinde ve světě,
- provozní zkušenosti ČEZu s tímto typem elektráren - Dukovany a Temelín jsou II. generací PWR,
- výkon odpovídající optimálnímu využití současné lokality Temelín a potřebám České republiky do budoucích let včetně rozšířených možností regulace výkonu.
- V oblasti jaderné energetiky reprezentují bloky III. resp. III.+ generace současnou úroveň BAT (Best Available Techniques). Jde o nejnovější projekty jaderných elektráren, které vykazují oproti minulým generacím lepší technologické, bezpečnostní a ekonomické vlastnosti. Jaderná elektrárna bude realizovaná v souladu s legislativou České republiky a s aktuálními mezinárodně uznávanými bezpečnostními požadavky relevantními pro jadernou technologii. Za závazné požadavky jsou považovány:
- Zákony a prováděcí právní předpisy České republiky, včetně mezinárodních smluv a konvencí, kterými je Česká republika vázána,
- bezpečnostní standardy IAEA (International Atomic Energy Agency),
- při normálním i abnormálním provozu nového jaderného zdroje nebudou překročeny autorizované limity pro vypusti radionuklidů do životního prostředí,
- žádná událost, při které nedojde k tavení aktivní zóny, nepovede k úniku radionuklidů vyžadujícímu zavedení ochranných opatření ukrytí, jódové profylaxe a evakuace obyvatel kdekoli v okolí nového jaderného zdroje,
- pro postulované nehody s tavením aktivní zóny budou přijata taková projektová opatření, aby v bezprostředním okolí nebyla nutná evakuace obyvatel.

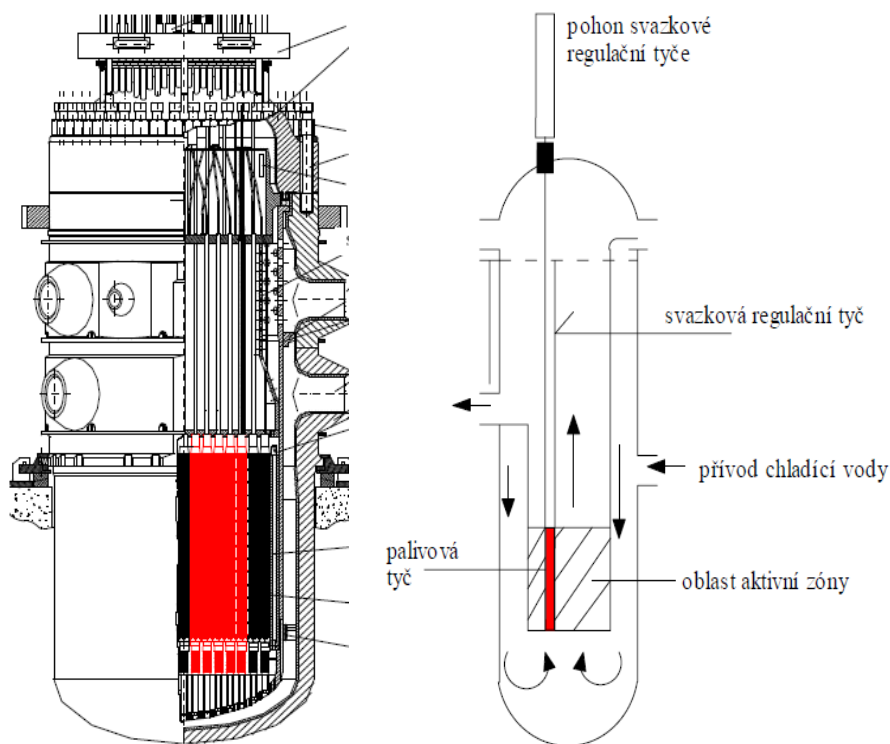
Cíle bakalářské práce:

- 1) Vytvořit přehled typů jaderných reaktorů III. generace aktuálních pro dostavbu jaderné elektrárny Temelín (MIR 1200 a AP 1000) a rozdělit je podle vhodných kritérií.
- 2) Popsat princip činnosti a konstrukci vybraných typů jaderných reaktorů a jejich aktivních a pasivních bezpečnostních systémů.
- 3) Zhodnotit předkládané projekty z hlediska technického a jaderně bezpečnostního.
- 4) Provést zjednodušený výpočet tepelné účinnosti pro danou modelovou koncepci II. okruhu pro parametry převzaté z projektů pro dostavbu Temelína.

1 Jaderná elektrárna Temelín a jeho dostavba

Jaderná elektrárna Temelín se nachází zhruba 6km od Týna nad Vltavou a 25 km od Českých Budějovic. První zmínky o jaderné elektrárně Temelín se objevili v únoru 1979, kdy byl vydán investiční záměr. Rozhodnuto o výstavbě bylo v roce 1980 a v roce 1982 byl uzavřen kontrakt na dodávku sovětského technického projektu. O zpracování se zasloužil Energoprojekt Praha v roce 1985. Samotná výstavba byla zahájena v roce 1987, ale první přípravné práce byly uskutečněny již v roce 1983. První palivo bylo zavazeno v červenci roku 2000 a první blok vyrobil první elektřinu 21. 12. 2000.[9]

V současné době jsou v Temelíně dva bloky s reaktory VVER 1000. Zkratka VVER vychází z ruského názvu (vodo-vodní energetický reaktor). Tepelný výkon reaktoru je 3000 MW, tlaková nádoba má rozměry 10,9 metrů na výšku a 4,5 metrů v průměru. Obsahem je 163 palivových článků s obohacením 3,5 % a také zde jsou regulační tyče, kterých je zde 61 kusů. Vsázka do reaktoru odpovídá 92 tunám. Pro reaktor VVER 1000 se jako chladivo a moderátor používá obyčejná neboli lehká voda. Primární okruh je sestaven z tlakovodního reaktoru, čtyř cirkulačních smyček a systému kompenzace objemu. Jedna cirkulační smyčka obsahuje parogenerátor a cirkulační čerpadlo. Teplo odvádí primární chladivo, které proudí do parogenerátoru (pracuje jako tepelný výměník) a zchlazené se přes cirkulační čerpadlo vrací zpět do reaktoru.[1]



Obrázek 1.1 Schéma reaktoru VVER 1000 [1]

1.1 Technické parametry JE Temelín [1]

Technická data elektrárny

Počet bloků	2
Typ reaktoru	Tlakovodní energetický reaktor VVER 1000

Výkon jednoho bloku

Nominální tepelný výkon	3000 MWt
Výkon na svorkách alternátoru	981 MWe
Výkon dodávaný do elektrické sítě	912 MWe
Vlastní spotřeba	69 MWe

Technické parametry reaktoru

Výška tlakové nádoby	10,9 m
Vnitřní průměr tlakové nádoby	4,5 m
Síla stěny válcové části nádoby	193 mm
Tloušťka nerezové výstelky	7 – 18 mm
Hmotnost reaktoru bez chladiva	cca 800 t
Hmotnost tlakové nádoby	322 t

Aktivní zóna reaktoru

Počet palivových kazet	163
Počet palivových proutků v kazetě	312
Počet regulačních svazkových tyčí	61
Výška aktivní zóny	3,6 m
Průměr aktivní zóny	3,1 m
Obohacení paliva	max. 5 % U 235
Vsázka paliva (UO ₂)	92 t
Cyklus výměny paliva	čtyřletý

Systém chlazení reaktoru

Počet chladicích smyček	4
Vnitřní průměr hlavního cirkulačního potrubí	850 mm
Objem chladiva v primárním okruhu	337 m ³
Pracovní tlak	15,7 MPa
Teplota chladiva na vstupu	cca 290 ^o C
Teplota chladiva na výstupu	cca 320 ^o C
Průtok chladiva reaktorem	84 800 m ³ /hod

Parogenerátor

Počet na blok	4
Množství páry vyrobené v jednom parogenerátoru	1470 t/hod
Tlak páry na výstupu	6,3 MPa
Teplota páry na výstupu	278,5 ^o C
Hmotnost parogenerátoru	cca 416 t

Průměr tělesa parogenerátoru	4,2 m
Délka tělesa parogenerátoru	14,5 m

Hlavní cirkulační čerpadlo

Počet na blok	4
Příkon jednoho čerpadla	5,1 – 6,8 MW
Provozní výkon	cca 21 200 m ³ /hod
Jmenovité otáčky	1000 ot/min
Hmotnost čerpadla	cca 156 t

Ochranná obálka (kontejment)

Výška válcové části	38 m
Vnitřní průměr válcové části	45 m
Tloušťka stěny	1,2 m
Tloušťka nerezové výstelky	8 mm

Turbína

Počet VT dílů	1
Počet NT dílů	3
Jmenovité otáčky	3000 ot/min
Hmotnost VT dílu	206 t
Hmotnost NT dílu	480 t

Alternátor

Jmenovitý zdánlivý výkon	1111 MVA
Účinník	0,9
Napětí na svorkách	24 kV
Jmenovitá frekvence	50 Hz
Chlazení	vodík - voda
Hmotnost	564 t

Kondenzátor

Počet na jednu turbínu	3
Počet trubek v jednom kondenzátoru	cca 32 000
Délka trubky	12 m
Materiál	titan

Chladicí věže

Počet na blok	2
Výška	154,8 m
Průměr v koruně věže	82,6 m
Patní průměr	130,7 m
Tloušťka pláště	0,9 – 0,18 m
Počet šikmých stojek	112
Průtok vody jednou věží	cca 17,2 m ³ /s
Odpar z jedné věže	max. 0,4 m ³ /s

Elektrárenská společnost ČEZ zahájila výběrové řízení na výstavbu dvou jaderných bloků v jaderné elektrárně Temelín. Vyhlášení tohoto tendru je v souladu s energetickou politikou České republiky. Administrativní proces má trvat sedm až osm let, samotná dostavba by pak mohla trvat zhruba 15 let.

Co by měl zajistit nový projekt?

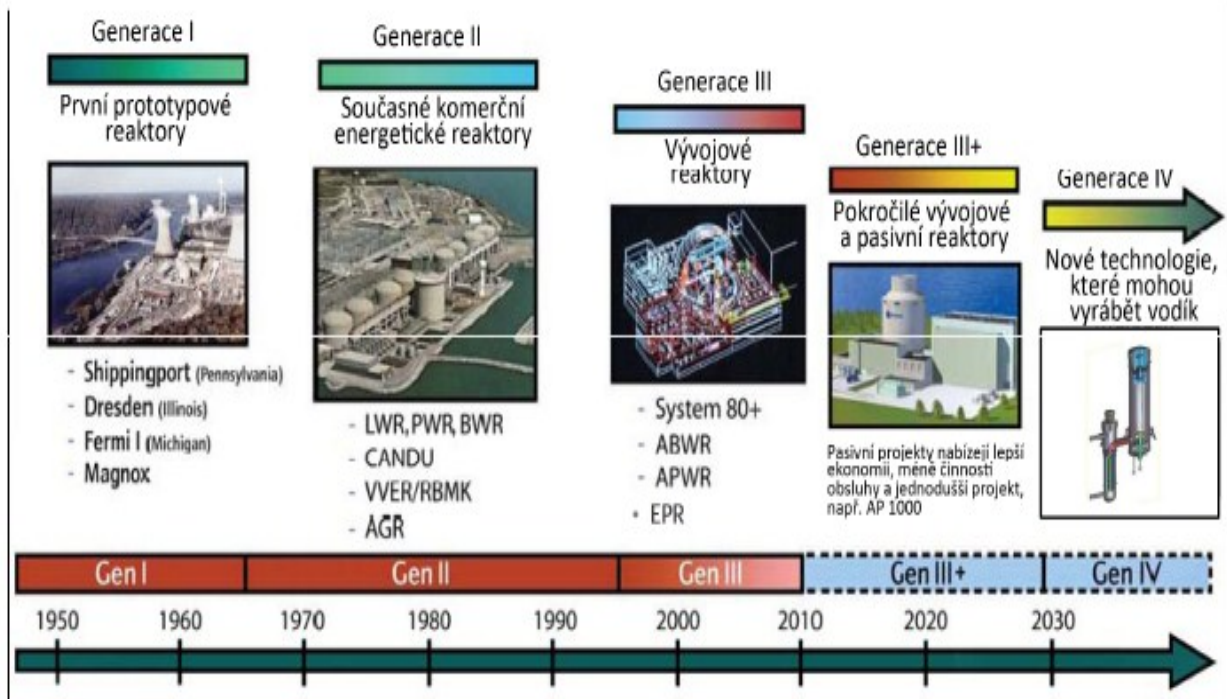
Jednoduchou a spolehlivou konstrukci, která bude schopna zabezpečit:

- vysokou provozní bezpečnost,
- minimalizaci možnosti vzniku velké havárie,
- vysokou odolnost proti lidským chybám,
- využití gravitačního proudění pro odvod zbytkového tepla jaderného reaktoru,
- zpětnovazební efekt – záporná výkonová zpětná vazba jaderného reaktoru,
- využití rozdílu tlaků v hydroakumulátorech s kyselinou boritou,
- zajištění podmínek pro přirozené proudění při výpadku proudu, které zajišťuje odvod zbytkového tepla,
- vysokou teplotu tavení paliva,
- snížení možnosti úniku chladiva.

Maximální důraz je kladen na pasivní bezpečnostní prvky, které fungují na základě jednoduchých fyzikálních principů bez lidského zásahu.

Požadavky na moderní jaderné energetické zdroje III+. generace:

- vyšší bezpečnost, nižší pravděpodobnost poškození aktivní zóny s praktickým vyloučením evakuačních opatření,
- konkurenceschopnost se zlepšenou ekonomikou, zkrácení doby projektu, výstavby a licencování, nižší náklady na provoz, údržbu a na palivový cyklus, zvýšený faktor využití,
- řízení odpadů, redukce objemů a radiotoxicity jaderných odpadů,
- vyšší využití jaderného paliva, vyšší vyhoření, recyklování paliva, využití paliva MOX,
- zajištění inherentní bezpečnosti. Je to bezpečnostní systém, který je netečný vůči lidským chybám nebo úmyslným zásahům i proti vnějším vlivům,
- pasivní bezpečnost- zahrnuje pasivní systémy regulace výkonu, chlazení aktivní zóny a jejího havarijního dochlazování. Fungují i v případě výpadku dodávky proudu pro čerpadla, regulační ventily a jiné, při současném selhání několika zdrojů energie.



Obrázek 1.2 Generace jaderných elektráren z hlediska jaderné bezpečnosti [12]

1.	Areva EPR	
2.	(Areva Kerena BWR)	
3.	Areva-Mitsubishi Atmea	
4.	Atomstroyexport VVER-1200	
5.	CNGPC CPR-1000	
6.	GE-Hitachi ESBWR	 
7.	KEPCO APR1400	
8.	Mitsubishi APWR	
9.	SNC Lavalin CANDU	
10.	Toshiba-Westinghouse AP1000	 

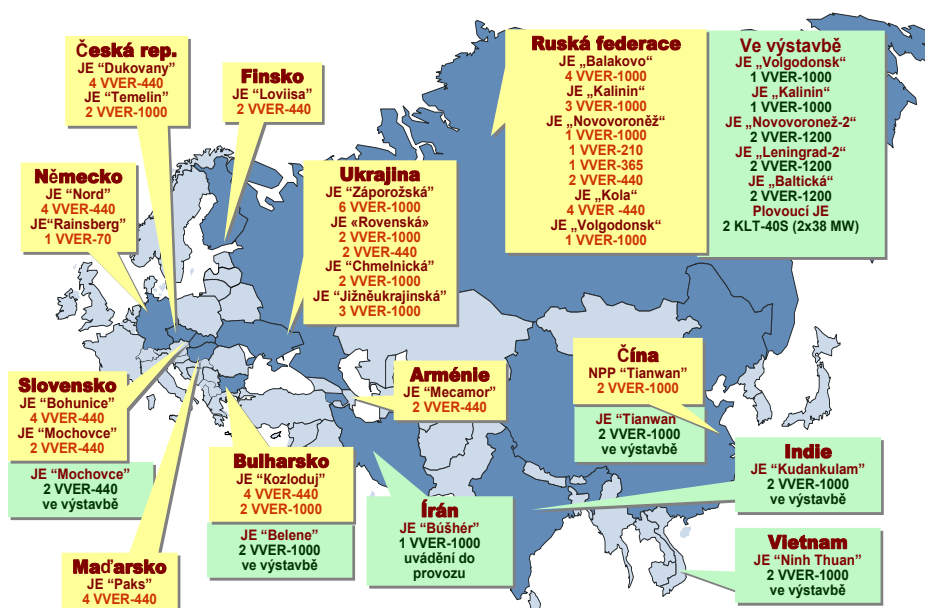
Obrázek 1.3 Přehled světových výrobců jaderných elektráren generace III+ v roce 2013 [12]

2 Jaderná elektrárna MIR 1200

Mezinárodní česko-ruské sdružení – konsorcium MIR.1200 (Škoda JS, Gidropress,a Atomstojexport) bylo založeno 14.10.2009. Úkolem konsorcia je předložit konkurenceschopné nabídky pro dostavbu třetího a čtvrtého bloku v Temelíně s použitím reaktorů generace III+ . Projekt je nabízen kromě ČR také v Maďarsku, Turecku, Vietnamu a Jordánsku a v současné době je budováno 10 těchto reaktorů v Ruské federaci, Indii a Íránu.[3]



Obrázek 2.1 MIR.1200 [4]



Obrázek 2.2 Jaderné elektrárny s technologií VVER [3]

Bezpečnostní koncepce jaderné elektrárny MIR 1200 je založena na aktivních bezpečnostních systémech, které mají k dispozici normální i nouzové (havarijní) napájení – z dieselgenerátorů. K odvrácení těžkých havárií nebo utlumení jejich následků slouží navíc pasivní systémy, které fungují bez zásahu personálu jaderné elektrárny a nepotřebují elektrické napájení. Bezpečnostní systémy se skládají ze čtyř zcela nezávislých kanálů. Kapacita, rychlost činnosti a další charakteristiky každého kanálu jsou vybrány na základě podmínek pro zajištění jaderné a radiační ochrany při projektem předpokládaných událostech. Díky umístění kanálů bezpečnostních systémů v oddělených prostorách je dosaženo vysokého stupně fyzického oddělení -separace - kanálů. Bezpečnostní kanály jsou jeden od druhého odděleny ohnivzdornými bariérami po celé délce, včetně komunikace mezi budovami. Přímá spojení mezi různými bezpečnostními kanály jsou nepřipustná.

Základní bezpečnostní charakteristiky

- Dvojitá ochranná obálka (kontejnment) vnitřní kontejnment má regulovatelný systém předpínání.
- Čtyři kanály aktivních bezpečnostních systémů (4 x 100%) se zlepšeným uspořádáním a řadou originálních řešení.
- Maximální použití osvědčených technických řešení a zařízení.
- Speciální inženýrská opatření pro zvládnutí i nadprojektových havárií.
- Lapač taveniny aktivní zóny.
- Rekombinátory vodíku.
- Systém pasivního odvodu tepla, založený na využití pasivních principů (SPOT) pro: odvod tepla z PG, odvod tepla z ochranné obálky.

Projekt MIR-1200 oproti VVER 1000 dosáhl zlepšení především v těchto bodech:

- Zvýšení elektrického výkonu.
- Zvýšení tepelného výkonu.
- Zvýšení tlaku páry na výstupu z generátoru.
- Zmenšení tlakových ztrát v hlavním parovodu na 0,2 MPa.
- Konstrukce kontejmentu.
- Bezpečnostní systémy.
- Programovatelný digitální systém kontroly a řízení.
- Účinnost jaderné elektrárny.
- Doba výstavby JE (54 měsíců).
- Životnost JE (60let).

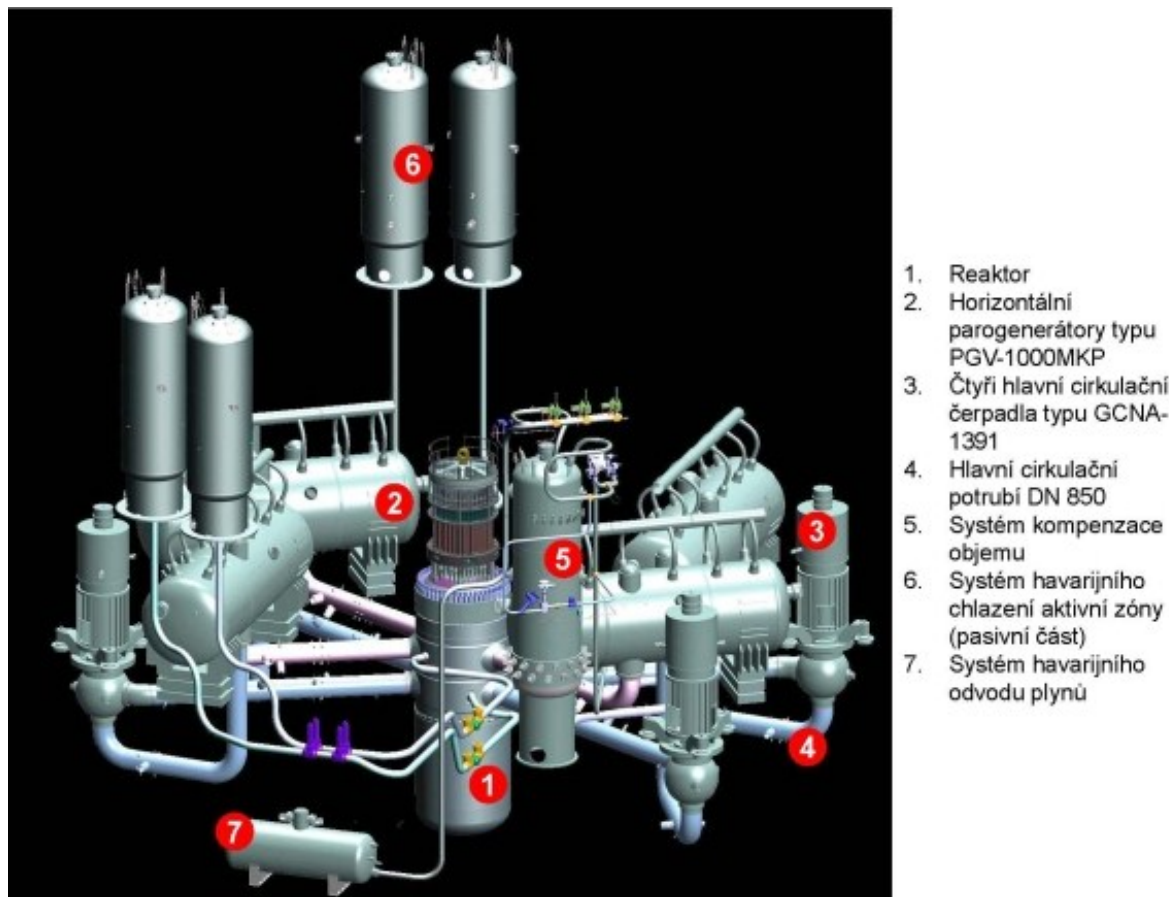
Evoluční změnou oproti VVER 1000 je zejména konstrukce kontejmentu. Je dvouplošťový, přičemž vnější plášť je ze železobetonu a je projektován proti vnějším přírodním či lidským vlivům. Bezpečnostní systémy projektu MIR-1200 lze rozdělit na: aktivní a pasivní bezpečnostní systémy.

<u>Jaderná elektrárna</u>	
Instalovaný výkon	1160 MWe
Učinnost (čistá)	33,70%
Projektová životnost	50 let
<u>Reaktor</u>	
Tepelný výkon	3200 MWt
<u>Aktivní zóna</u>	
Palivo	obohacený uran v podobě UO_2 (palivo obsahuje vyhořívající absorbátor gadolinium)
Obohacení	4,79%
Počet palivových souborů	163
Počet absorpčních tyčí	121
Palivový cyklus	12 měsíců
<u>Systém chlazení reaktoru</u>	
Počet chladících smyček	4
Pracovní tlak	16,2 MPa
Teplota chladiva na vstupu	298,2 °C
Teplota chladiva na výstupu	328,9 °C
Průtok chladiva reaktorem	23,9 m³/s
<u>Parogenerátor</u>	
Počet na výrobní blok	4
Odběr páry z 1 parogenerátoru	1602 t/hod
Tlak páry na výstupu	7 MPa
Teplota páry na výstupu	285,8 °C
<u>Kontejnment – vnitřní obálka</u>	
	- předepjatý beton + ocelová vystýlka
Průměr (vnitřní)	44 m
Tloušťka stěny	1,2 m
Projektový tlak	0,4 MPa
<u>Kontejnment – vnější obálka</u>	
	- předepjatý beton
Průměr (vnitřní)	50 m
Výška	70,2 m
Tloušťka stěny	0,8 m (ve válcové části)
<u>Turbosoustrojí</u>	
Počet na výrobní blok	1
Počet dílů turbíny	1 vysokotlaký + 4 nízkotlaké
Otáčky	3000

Tabulka 2.1 Základní charakteristiky projektu MIR 1200 [3]

2.1 Primární okruh

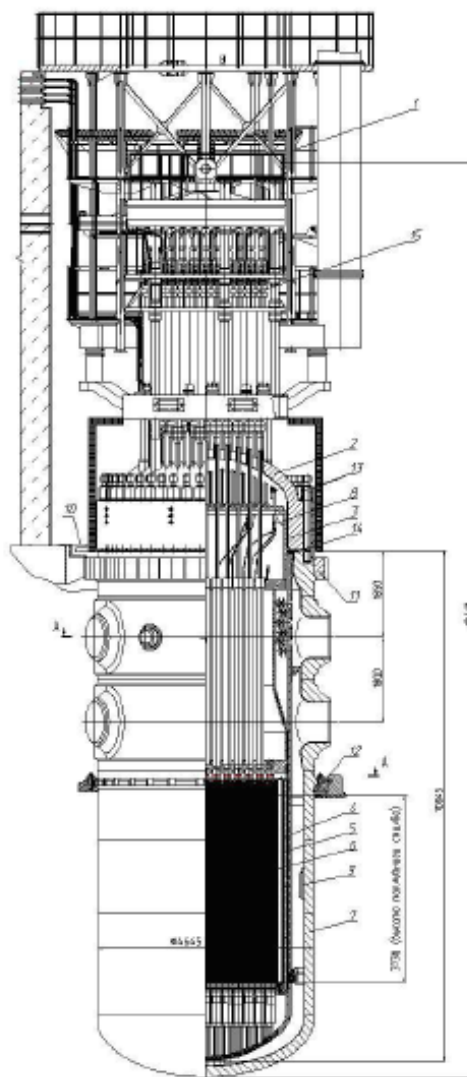
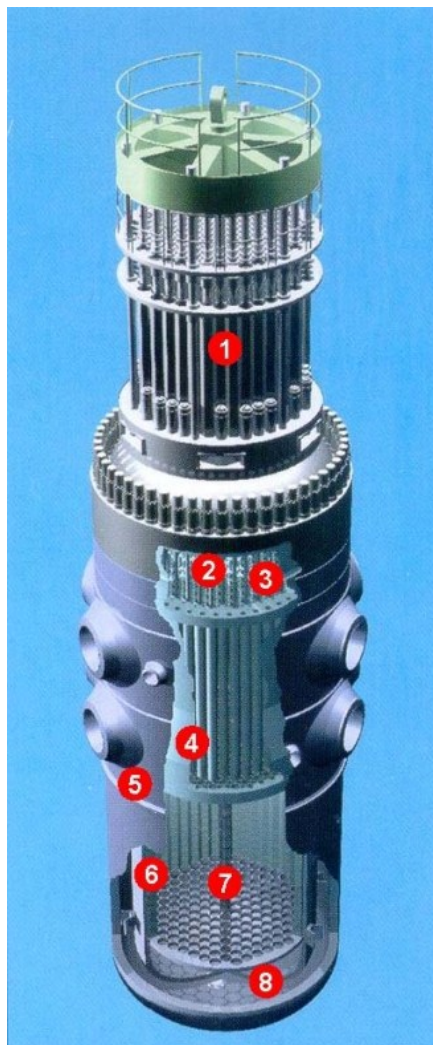
Mezi hlavní komponenty primárního okruhu patří reaktor (typ VVER 1200/V-491), parogenerátor (typ PGV-1000MKP), kompenzátor objemu (typ -), hlavní cirkulační čerpadlo (typ GCNA-1391).[3]



Obrázek 2.3 Uspořádání primárního okruhu MIR 1200 [3]

2.1.1 Reaktor VVER-1200/V-491

VVER-1200 je klasický tlakovodní energetický reaktor s tlakovou nádobou. Zařízení reaktoru slouží k výrobě suché nasycené páry, která proudí do turbíny, kde se energie páry mění na energii elektrickou. Hlavní částí reaktoru jsou tlaková nádoba, aktivní zóna, regulační orgány a čidla vnitro-reaktorového měření. V tlakové nádobě jsou umístěny vnitřní části jako šachta reaktoru, plášť aktivní zóny a bok ochranných trub. Celkově se zařízení nějak zásadně rozměrově nezměnilo. Několik rozměrových změn nastalo u tlakové nádoby. Omezen byl také obsah niklu a škodlivých příměsí v základních materiálech i ve svarech.

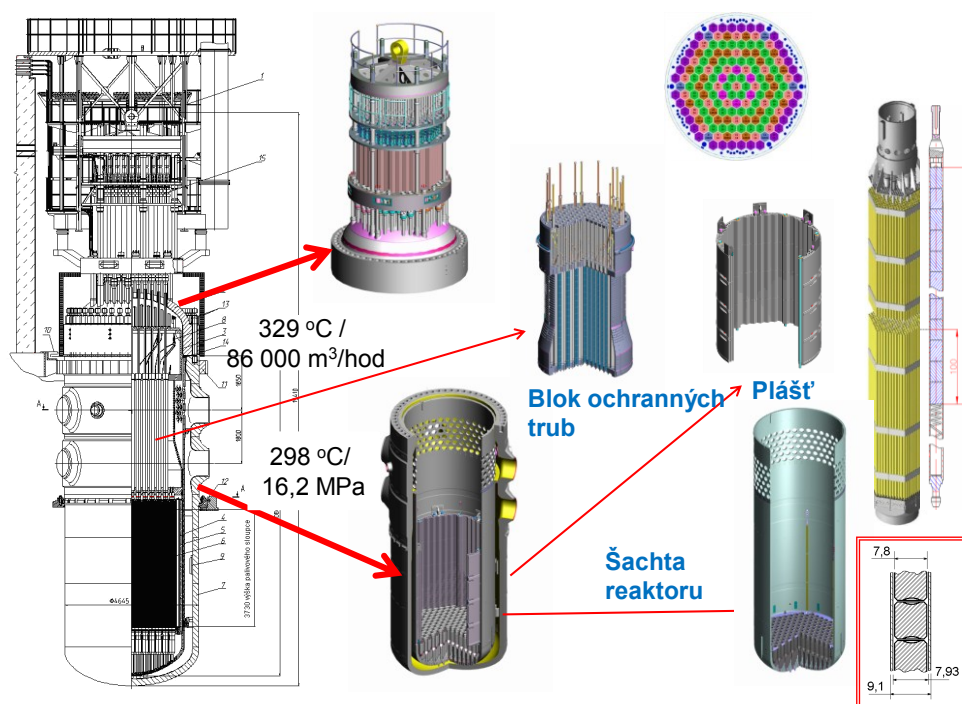


1. Horní blok 2. Pohony řídících tyčí 3. Kanály neutronového měření 4. Blok ochranných trub 5. Nádoba reaktoru 6. Plášť aktivní zóny 7. Palivový soubor 8. Šachta

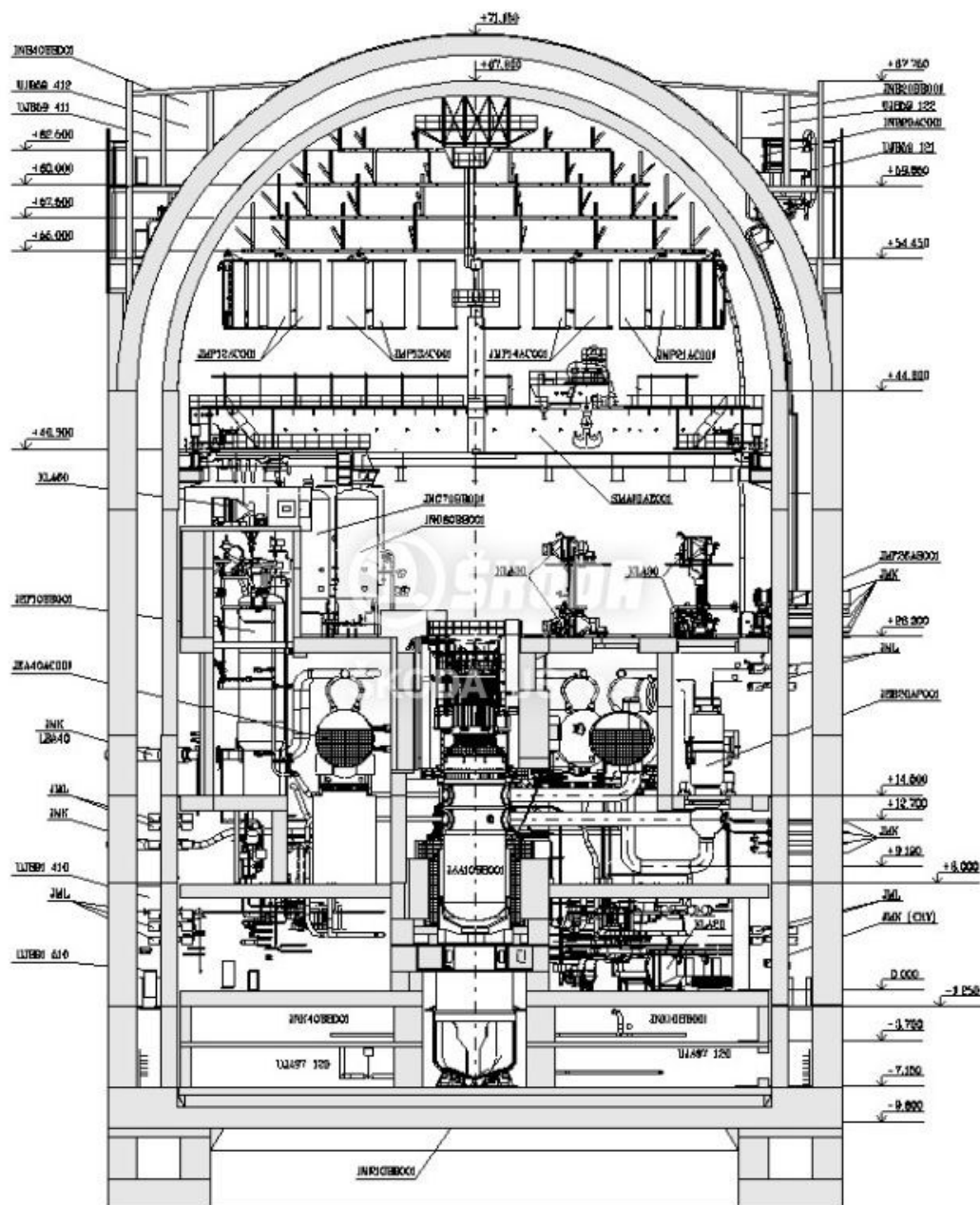
Obrázek 2.4 Reaktor VVER-1200 [3]

Parametr	Typ tlakové nádoby	
	V-1200	V-320
Délka [mm]	11185	10897
Vnitřní průměr [mm]	4250	4150
Tloušťka stěny AZ [mm]	197,5	192,5
Hmotnost [t]	330	320

Tabulka 2.2 Porovnání parametrů tlakových nádob reaktoru [3]



Obrázek 2.5 Kompletní sestava jaderného reaktoru MIR 1200[3]

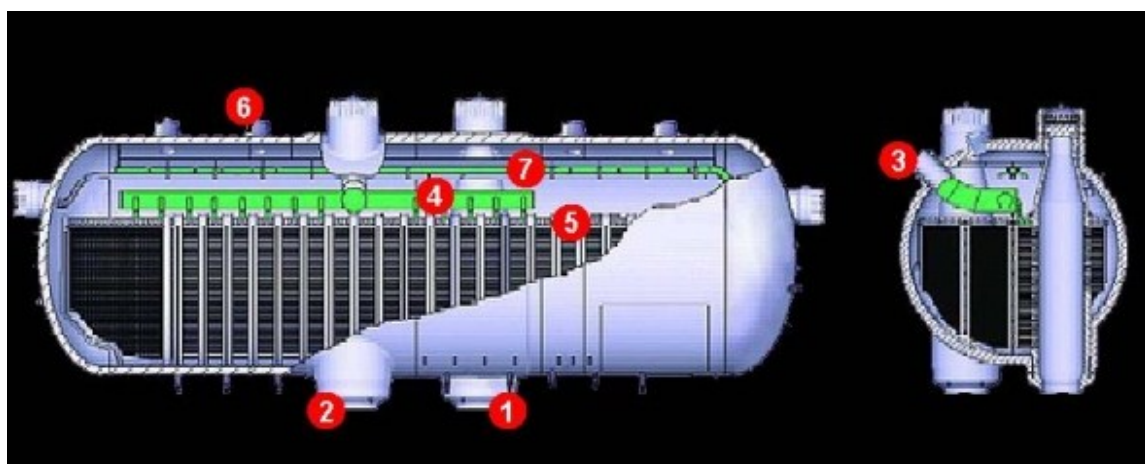


Оbrázek 2.6 Příčný řez kontejmentem s lapačem coria MIR 1200 [3]

2.1.2 Parogenerátor

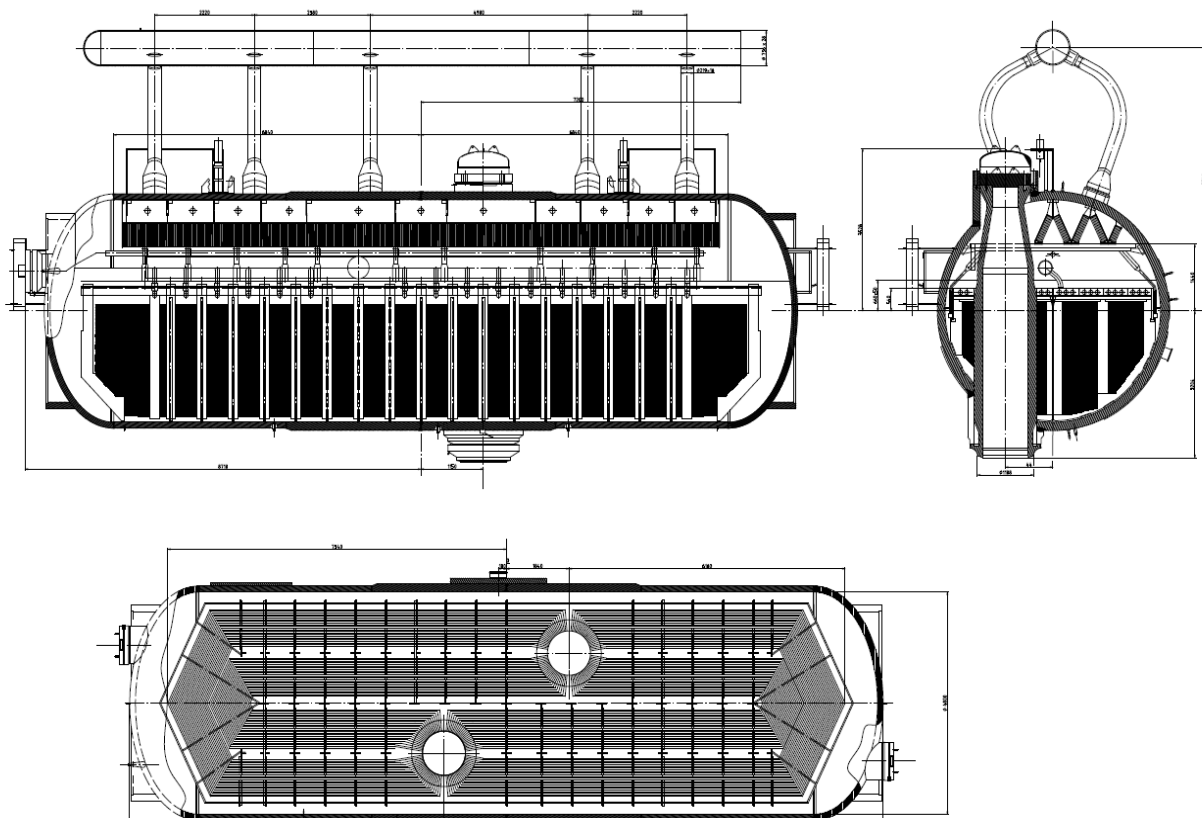
U projektu MIR.1200 je použit parogenerátor PGV-1000MKP. Jedná se o horizontální parogenerátor, které jsou vždy použity u okruhu VVER. Tento typ parogenerátoru má vylepšené bezpečnostní charakteristiky, je spolehlivější a je lepší i obsluha v provozu. Použito je koridorové uspořádání trubek v teplosměnném svazku. Objem vody pro sekundární část byl navýšen z 52 na 63m³. Jeho vylepšené vlastnosti lze charakterizovat jako:

- Velká zásoba vody v sekundárním okruhu.
- Zvýšená rychlost cirkulace v trubkovém svazku.
- Snížená možnost ucpávání mezitrubkového prostoru uvolněným kalem.
- Zjednodušený přístup pro inspekci mezitrubkového prostoru.
- Snížené namáhání kolektoru chladiva.
- Teplosměnné trubky s minimálním obsahem kobaltu což umožňuje snížit dávkové zatížení obsluhujícího personálu během plánovaných odstávek.
- Oplachovací zařízení pro odstranění kalu ze spodních výměňkových trubek a tělesa parogenerátoru v době plánovaných odstávek.[3]



1. Vstup chladiva, 2. Výstup chladiva, 3. Vstup napájecí vody, 4. Kolektor napájecí vody, 5. Ponořená děrovaná deska, 6. Parní nátrubek, 7. Děrovaná deska výstupu páry

Obrázek 2.7 Parogenerátor PGV-1000MKP [3]



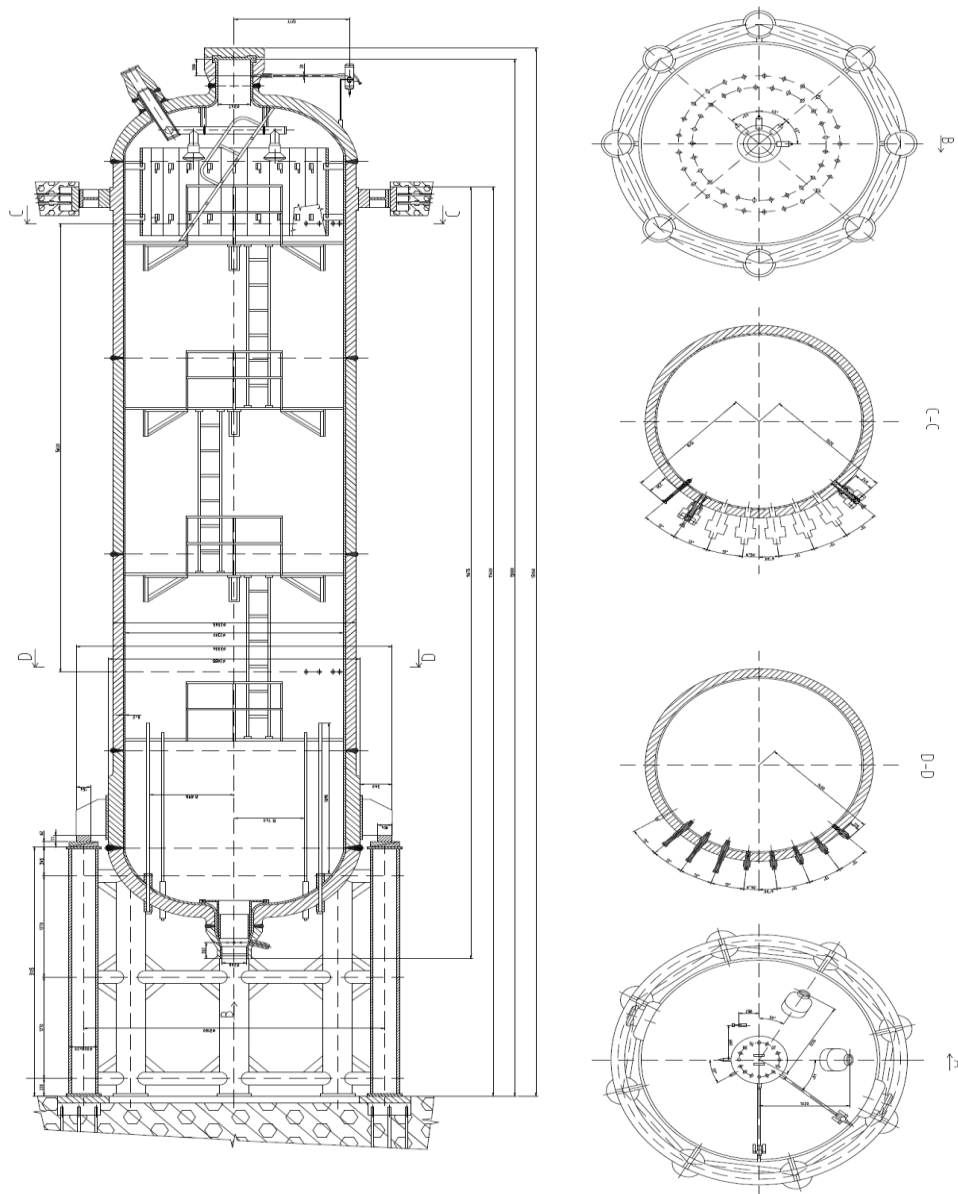
Obrázek 2.8 Projekční řešení parogenerátoru [3]

Parametr	V-1200	AES-91/99
Typ parogenerátoru	PGV-1000MKP	PGV-1000M
Počet na blok	4	4
Teplota páry na výstupu	285,8°C	278,5°C
Tlak	7 MPa	6,3 MPa
Množství vyrobené páry	1602 t/h	1470 t/h
Průměr tělesa	4,2 m	4,1 m

Tabulka 2.3 Porovnání parametrů parogenerátorů [3]

2.1.3 Kompenzátor objemu

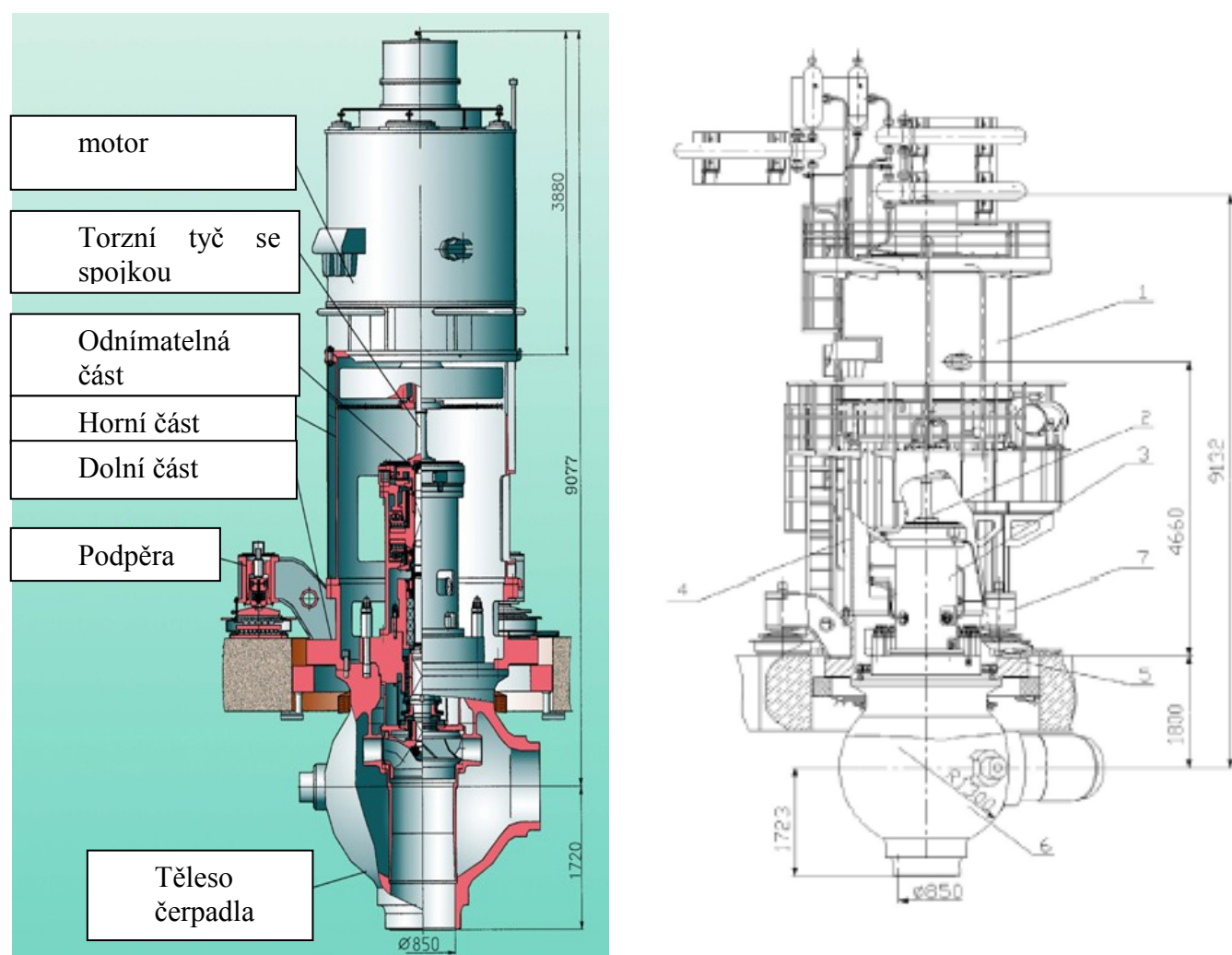
Kompenzátor objemu nabízený v projektu MIR.1200 má modernizovaný systém udržení tlaku v primárním okruhu. Udržení tlaku je dosaženo zavedením další trasy regulovaného vstřikování k regulaci tlaků v přechodových režimech.



Obrázek 2.9 Kompenzátor objemu [3]

2.1.4 Hlavní cirkulační čerpadlo

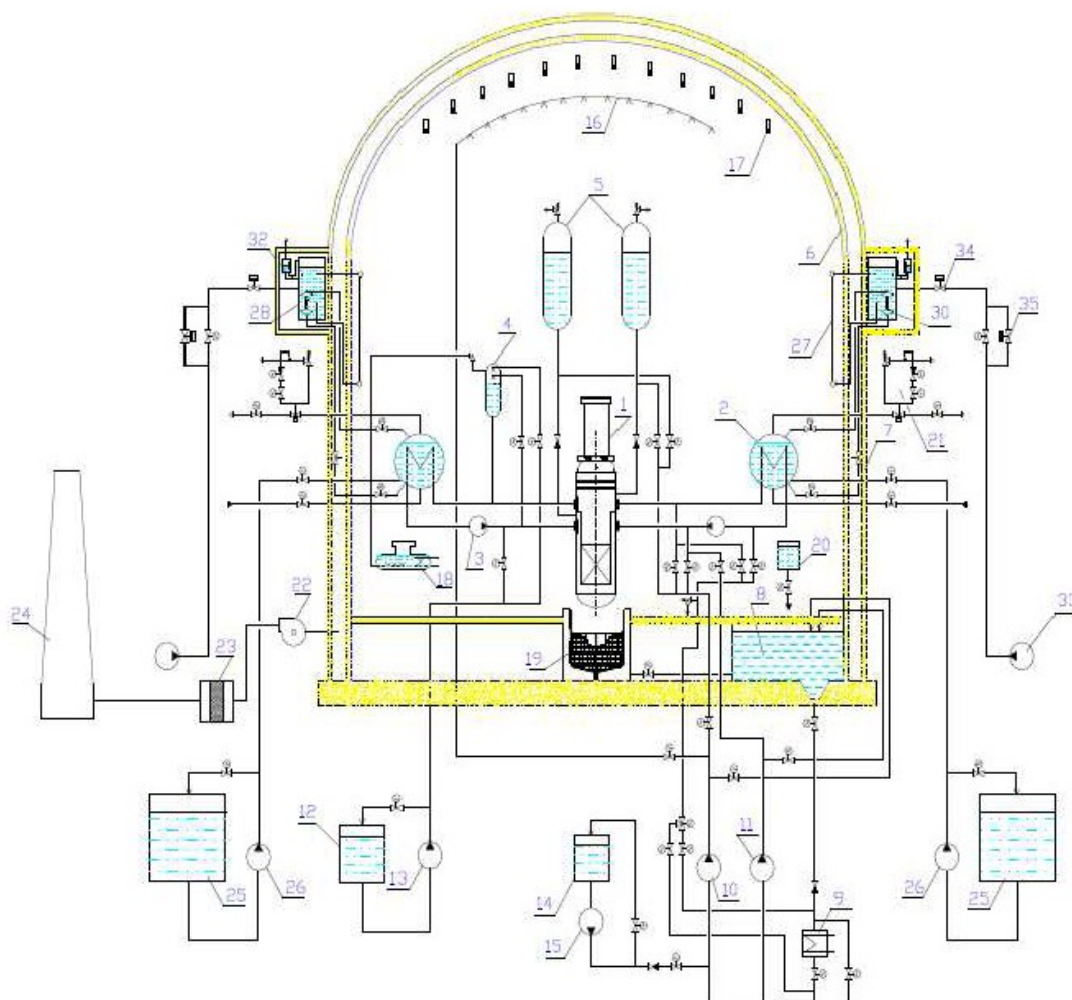
V projektu MIR.1200 je použito hlavní cirkulační čerpadlo typu GCNA-1391. U čerpadla tohoto typu je použita torzní tyč s lamelovou spojkou místo ozubené spojky. Díky použití radiálně-axiálního ložiska mazaného vodou nedochází k úniku mazacího oleje do primárního okruhu. V režimu odstávky zajišťuje odvod tepla z dolního radiálního ložiska přirozená cirkulace. Motor čerpadla se spouští od 750 ot/min a poté následuje přechod na jmenovitou rychlost otáček 1000 ot/min. Hlavní cirkulační čerpadlo typu GNCA-1391 je v současné době provozováno v jaderné elektrárně Tchien-wan v Číně.[3]



Obrázek 2.10 Hlavní cirkulační čerpadlo GCNA-1391 [3]

2.2 Bezpečnostní systémy

Bezpečnostní systémy použity u projektu MIR.1200 jsou jak na principu aktivním tak i na principu pasivním.



Obrázek 2.11 Schéma bezpečnostních aktivních a pasivních u I. okruhu MIR 1200 [4]

1 – Jaderný reaktor 2 – Parogenerátor 3 – Hlavní cirkulační čerpadla 4 – Kompenzátor objemu 5 – Hydroakumulátory 6 – Vnitřní kontejment 7 – Vnější kontejment 8 – Nádrž s bórovou vodou (nízká koncentrace H_3BO_3) 9 – Výměníky tepla 10 – Nizkotlaké havarijní čerpadlo 11 – Vysokotlaké havarijní čerpadlo 12 – Nádrž s bórovou vodou (vysoká koncentrace H_3BO_3) 13 – Čerpadlo bórové vody 14 – Napájecí nádrž s chemikáliemi 15 – Čerpadlo pro napájecí nádrž s chemikáliemi 16 – Sprchový systém 17 – Rekombinátory pro likvidaci vodíku v kontejmentu 18 – Barbotážní nádrž pro chlazení plynu z kompenzátoru objemu 19 – Lapač roztavené aktivní zóny 20 – Zásobní nádrž roztoku alkalického roztoku 21 – Hlavní parovodní ventil 22 – Ventilační jednotka pro vytvoření podtlaku 23 – Filtr 24 – Ventilační komín 25 – Nádrž demineralizované vody 26 – Havarijní čerpadlo napájecí vody 27 – Pasivní systém odvodu tepla z kontejmentu 28 – Nádrž pro pasivní systém odvodu tepla z kontejmentu 30 – Výměník tepla pro pasivní odvod tepla z parogenerátoru 32 – Hydrostatický uzávěr 33 – Čerpadlo pro doplňování 34 – Ventil pro kontrolu hladiny v 28 35 – Havarijní ventil pro doplňování 28

2.2.1 Pasivní bezpečnostní systémy

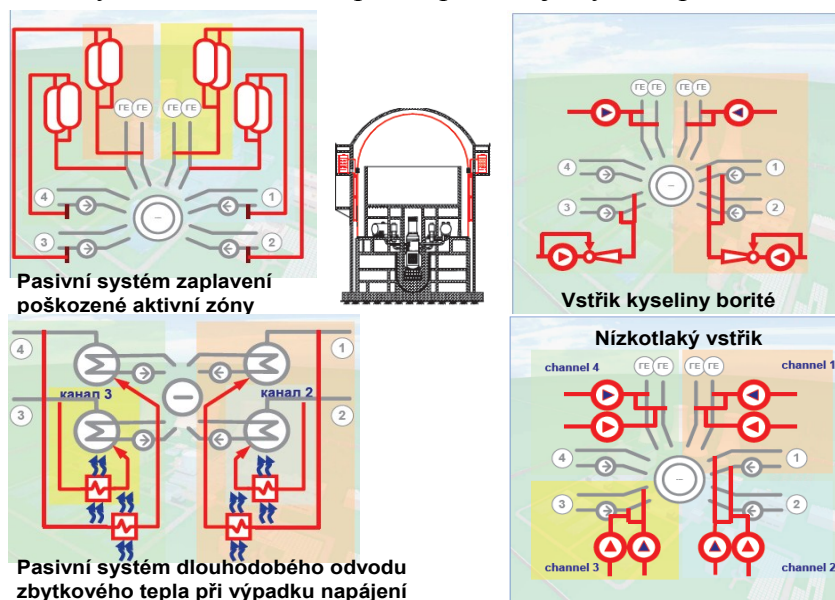
Tyto systémy slouží k úplnému odvrácení havárií nebo k utlumení jejich následků. Pro funkčnost těchto systémů není zapotřebí zásahu personálu a není zapotřebí elektrického napájení.

2.2.1.1 Pasivní systém odvodu tepla parogenerátory (SPOT PG)

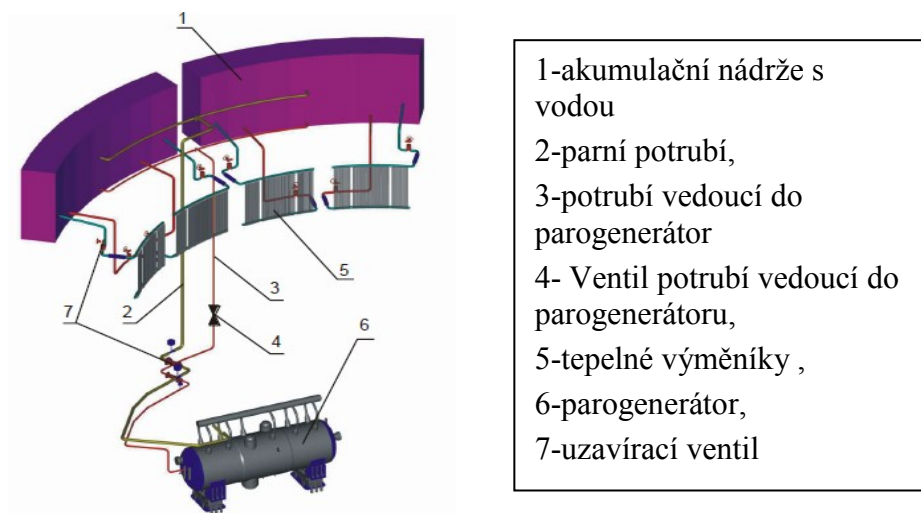
Hlavní prioritou tohoto systému je zabránění roztavení aktivní zóny. Systém pasivního odvodu tepla je aktivován, jestliže dojde k poruše čerpadel, které zásobují parogenerátor napájecí vodou, nebo nastane případ, že praskne primární potrubí. Systém při poruše je parogenerátor zcela zaplněn vodou z akumulární nádrže, která je umístěna mimo kontejnment, po naplnění parogenerátoru vzniká parovodní směs ta je potrubím odvedena do výměníků umístěných v akumulárních nádržích zde se ochladí a proudí zpět do parogenerátoru.[4,5,10]

2.2.1.2 Pasivní systém odvodu tepla z ochranné obálky (SPOT ZO)

Systém zajišťuje odvod tepla z ochranné obálky za normálního provozu ale i v případě havárie. Funkce je zajištěna, i když dojde k výpadku elektrické energie nebo k selhání sprchového systému. U systému je využito přirozené konvekce. Teplý vzduch ohřívá vodu která proudí do tepelného výměníku, který je umístěn v kontejmentu. Ohřátá voda je tlačena vodou studenou do výměníku, tento výměník je umístěn mimo kontejnment v akumulární nádrži. Pro tento systém není třeba čerpadel, protože je využito přirozené cirkulace. .[4,5,10]



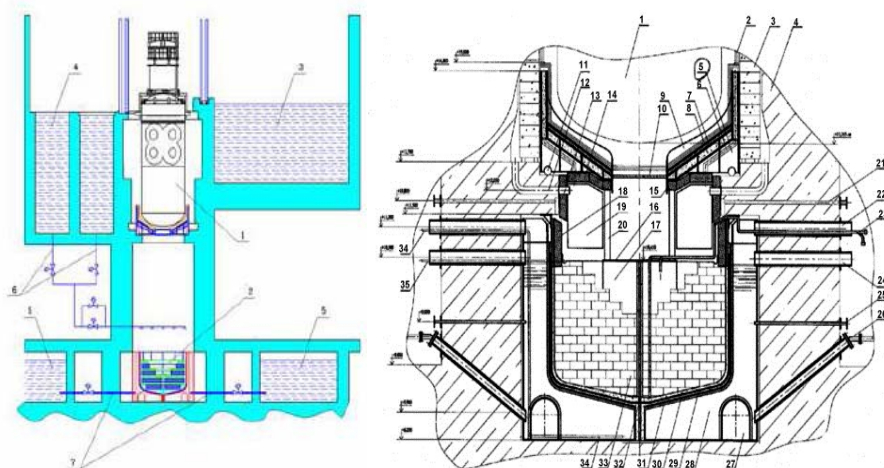
Obrázek 2.12 Schéma základních aktivních a pasivních systémů[5]



Obrázek 2.13 Model pasivního odvodu tepla z parogenerátoru a z kontejmentu. [5]

2.2.1.3 Lapač roztavené aktivní zóny

Při havárii kdy dojde k tavení aktivní zóny teče tavenina po protavení reaktorové nádoby směrem k lapači roztavené aktivní zóny. Slouží k zachycení taveniny a zajišťuje menší tvorbu plyných produktů tvořících se při tavení aktivní zóny a při chlazení taveniny. Tavenina je navíc chlazena bórovou vodou přes sprchové systémy. Chlazení roztavené aktivní zóny zajišťuje tepelný výměník, který je potrubím spojen se zásobníky vody. Roztavená aktivní zóna je chlazena ve spodní části vnitřního koše a po jeho stranách. Vnitřní koš výměníku tvoří ocelové struktury na bázi oxidu železitého a oxidu hlinitého. [4,5,10]

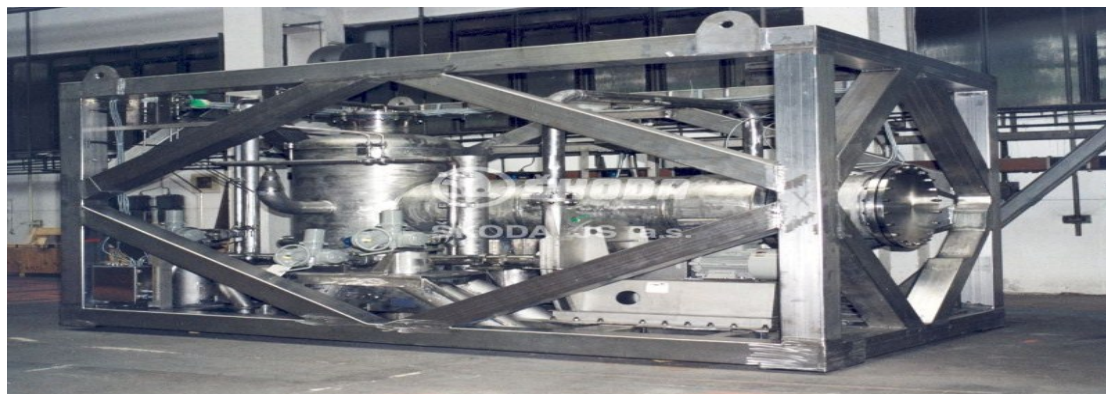


Obrázek 2.14 Lapač roztavené aktivní zóny [5]

1-Reaktor, 2-Lapač roztavené aktivní zóny, 3-Bazén výměny paliva, 4-Kontrolní šachty reaktoru, 5-Zásobníky vody, 6-Přívodní potrubí k roztavené aktivní zóně, 7-Potrubí mezi zásobníky a tepelnými výměníky

2.2.1.4 Systém kontroly vodíku v kontejmentu

Kvůli vodíku, který vzniká radiolýzou vody a korozí, je kontejnment vybaven rekombinačním zařízením pro udržování vodíku na přípustné hranici, aby nedošlo k explozi. Funkce zařízení je na principu zpětné reakce kdy se vodík sloučí s kyslíkem, vznikne voda a ta stéká po stěnách kontejmentu. Katalytické rekombinátory (použity u projektu MIR.1200) jsou schopny rekombinaci vodíku a kyslíku provést již při teplotách kolem 0 °C. Jako katalyzátor slouží nejčastěji platina a paladium. Tento typ rekombinátoru je schopen pracovat když je koncentrace vodíku okolo 1% a pracuje ve velkém rozmezí teplot a vlhkostí.[4,5,10]



Obrázek 2.15 Katalytický rekombinátor vodíku Škoda JS. [5]

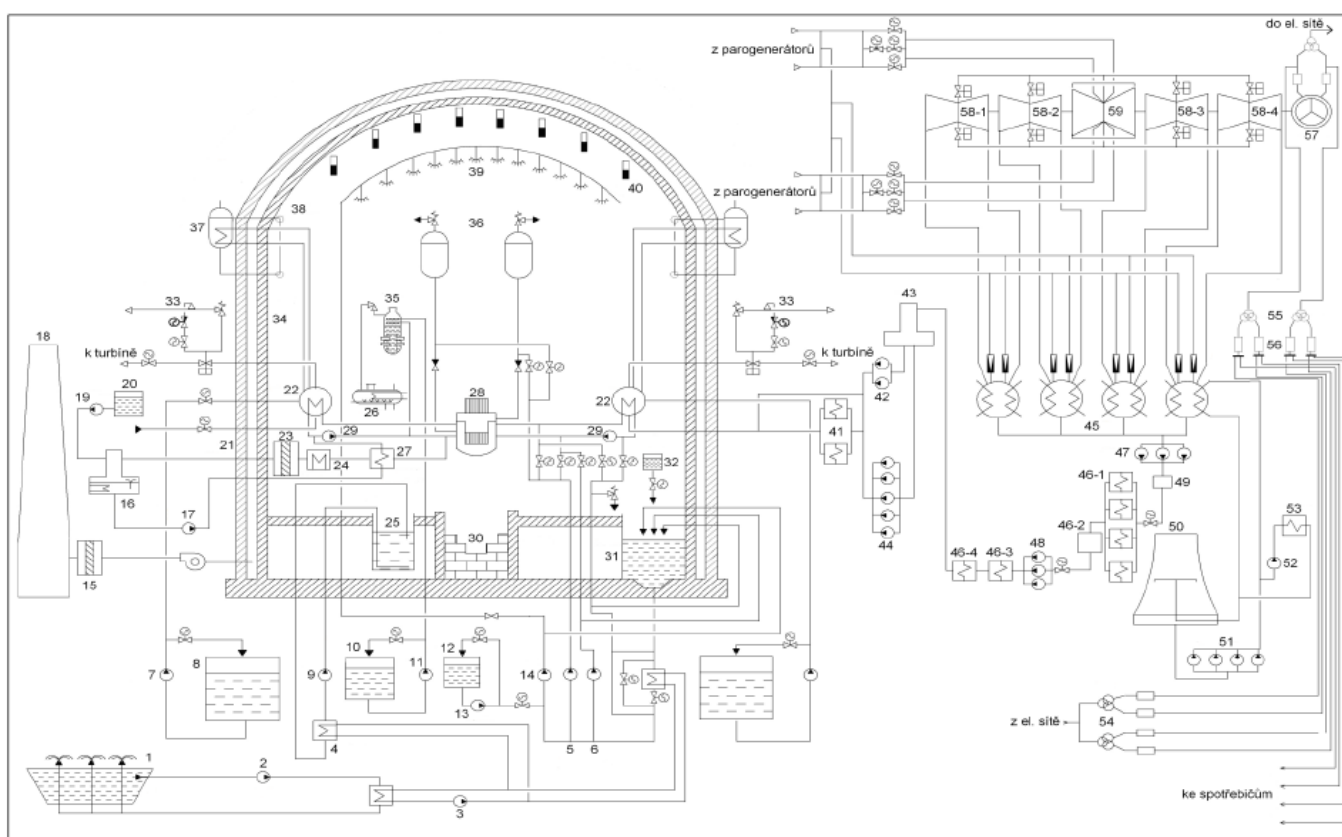
2.2.2 Aktivní bezpečnostní systémy

Aktivní bezpečnostní systémy mají k dispozici normální i nouzové (havarijní) napájení z diesel-generátorů. Můžeme zde zařadit tyto systémy:

- Sprchový systém,
- Nízkotlaká čerpadla havarijního dochlazování,
- Vysokotlaká čerpadla, která do primárního okruhu dávkuje kyselinu boritou
- Havarijní napájení parogenerátoru,
- Havarijní odvod paroplynové směsi z parogenerátoru,
- Havarijní odvod tepla paroplynové směsi z horní části jaderného reaktoru
- Vysokotlaké vstřikování kyseliny borité.[4,5,10]

2.3 Sekundární okruh

Sekundární okruh se skládá z: hlavního parního kolektoru, přepouštěcích stanic do atmosféry, přepouštěcích stanic do kondenzátoru, rychlozávěrných ventilů turbíny, regulačních ventilů turbíny, turbíny (čtyř nízkotlakých a jednoho vysokotlakého dílu), dvou separátorů s přehřívákem, čtyř hlavních kondenzátorů, kondenzátních čerpadel a napájecích čerpadel, napájecí nádrže s odplynovákem, nízkotlakých ohřevů (nízkotlaké regenerace), vysokotlakých ohřevů (vysokotlaké regenerace). Pára při průchodu vysokotlakým dílem turbíny ztratí přibližně 40 % své energie. Po vysušení a následném přehřátí v separátorech expanduje na čtyřech nízkotlakých dílech turbíny.



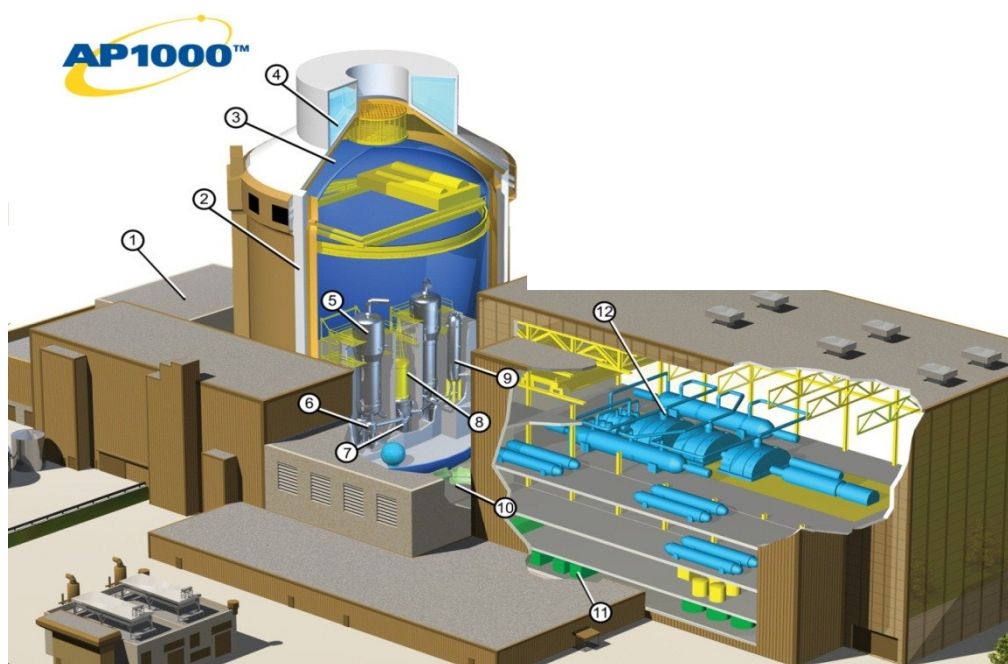
Obrázek 2.16 Zjednodušené schéma I. a II. okruhu včetně technologických okruhů [3]

Legenda k předchozímu obrázku

- | | |
|--|--|
| 1 – Bazén s rozstříkmem | 30 – Lapač taveniny |
| 2 – Čerpadlo technické vody důležité | 31 – Jímka |
| 3 – Čerpadlo meziokruhu | 32 – Nádrž havarijní zásoby alkálií |
| 4 – Výměník chlazení bazénu vyhořelého paliva | 33 – Hlavní blok parních armatur |
| 5 – Nizkotlaké čerpadlo havarijního doplňování | 34 – Ochranná obálka |
| 6 – Vysokotlaké čerpadlo havarijního doplňování | 35 – Kompenzátor objemu |
| 7 – Havarijní napájecí čerpadlo | 36 – Hydroakumulátory systému zalití zóny |
| 8 – Nádrže zásoby kyseliny borité vysoké koncentrace | 37 – Nádrž systému pasivního chlazení |
| 9 – Čerpadlo havarijního přívodu bóru | 38 – Kondenzátor systému pasivního chlazení kontejnmentu |
| 10 – Nádrž zásoby s roztokem kyseliny borité | 39 – Kolektor sprchových systémů |
| 11 – Čerpadlo havarijního přívodu bóru | 40 – Pasivní rekombinátor vodíku |
| 12 – Nádrž zásoby chemických reagentů | 41 – VTO (Vysokotlaký okruh) |
| 13 – Čerpadlo přívodu chemických reagentů | 42 – Pomocné napájecí elektrické čerpadlo |
| 14 – Čerpadlo sprchovacího systému | 43 – Odplynovák |
| 15 – Filtř | 44 – Elektrické napájecí čerpadlo |
| 16 – Odplynovák systému doplňování primárního okruhu | 45 – Kondenzátory |
| 17 – Čerpadlo systému doplňování primárního okruhu | 46 – NTO (Nizkotlaký okruh) |
| 18 – Větrací komín | 47 – Kondenzátní čerpadla 1. stupně |
| 19 – Čerpadlo organizovaných úniků | 48 – Kondenzátní čerpadla 2. stupně |
| 20 – Nádrž organizovaných úniků | 49 – Blokova úprava vody (BÚK) |
| 21 – Vnější ochranná obálka | 50 – Chladicí věž |
| 22 – Parogenerátor | 51 – Čerpadla cirkulační vody (chladičky) |
| 23 – Speciální úprava (očistka) vody | 52 – Čerpadlo technické vody |
| 24 – Dochlazovač | 53 – Spotřebiče strojovny |
| 25 – Bazén skladování vyhořelého paliva | 54 – Rezervní transformátor vlastní spotřeby |
| 26 – Barbotážní nádrž | 55 – Transformátor vlastní spotřeby |
| 27 – Regenerační vměník proplachu systému doplňování | 56 – Rozvodny vlastní spotřeby |
| 28 – Reaktor | 57 – Generátor |
| 29 – Hlavní cirkulační čerpadlo | 58 – Nizkotlaký díl turbíny |
| | 59 – Vysokotlaký díl turbíny |

3 Jaderná elektrárna Westinghouse AP1000

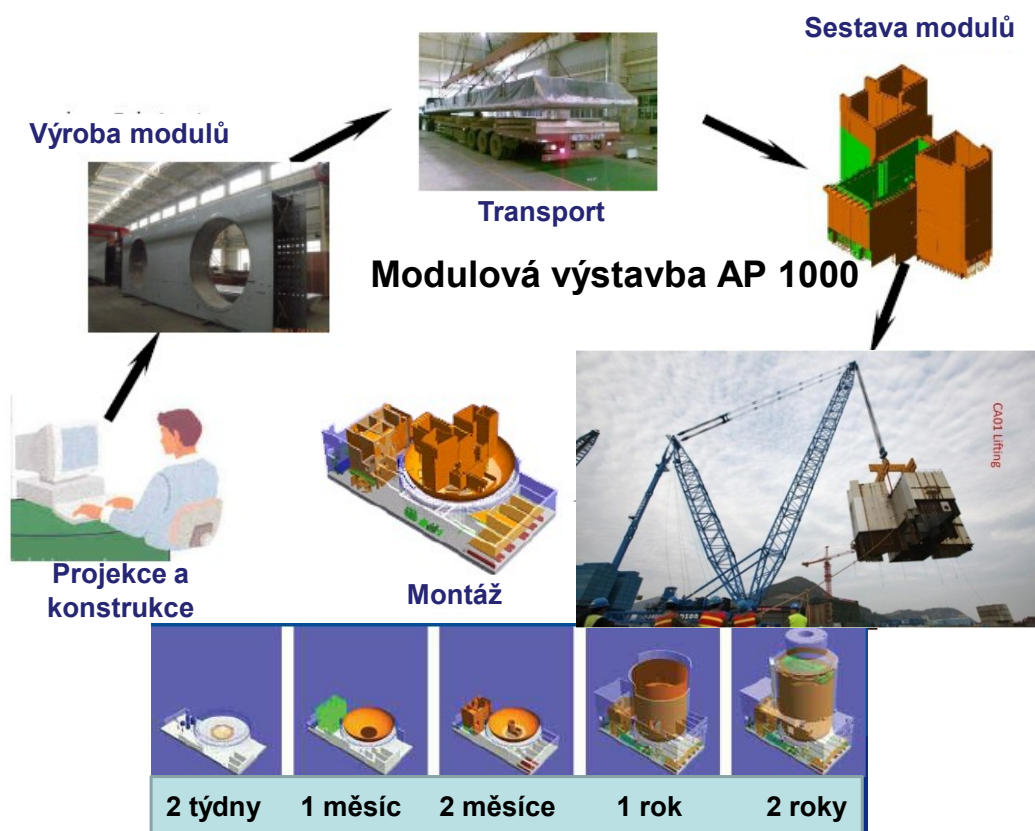
Jedná se o konsorcium Westinghouse Electric Company LLC (člen skupiny Toshiba Corporation) a Westinghouse Electric Czech Republic. Westinghouse obdržel licenci v roce 2006 v USA. Povolení Westinghouse získal pro výstavbu a provoz dvou bloků AP1000 v jaderné elektrárně Vogtle v Georgii. Licenci také získal v Číně a Velké Británii (zde byl projekt předběžně schválen v roce 2011). V současné době je ve výstavbě osm bloků v USA a Číně. V Číně se jedná o oblasti Sanmen (2009-2013) a Haiyang (2009-2014) v Číně. Westinghouse je předním dodavatelem jaderných technologií a průkopníkem v oblasti jaderné energetiky. Westinghouse se podílel na výstavbě prvního tlakovodního reaktoru v roce 1957 v pennsylvánském Shippingportu. Technologie dodávané touto společností se využívají zhruba v polovině jaderných elektráren ve světě.[11]



1-Manipulace s palivem, 2-betonový kontejnment, 3- ocelový kontejnment, 4-nádrž chladicí vody, 5-parní generátory, 6-hlavní cirkulační čerpadla, 7-reaktor, 8-řízení reaktoru, 9-kompenzátor objemu, 10-hlavní velín, 11-napájecí čerpadla II.okruhu, 12-turbína a generátor.

Obrázek 3.1 Schéma jaderného energobloku Westinghouse [6]

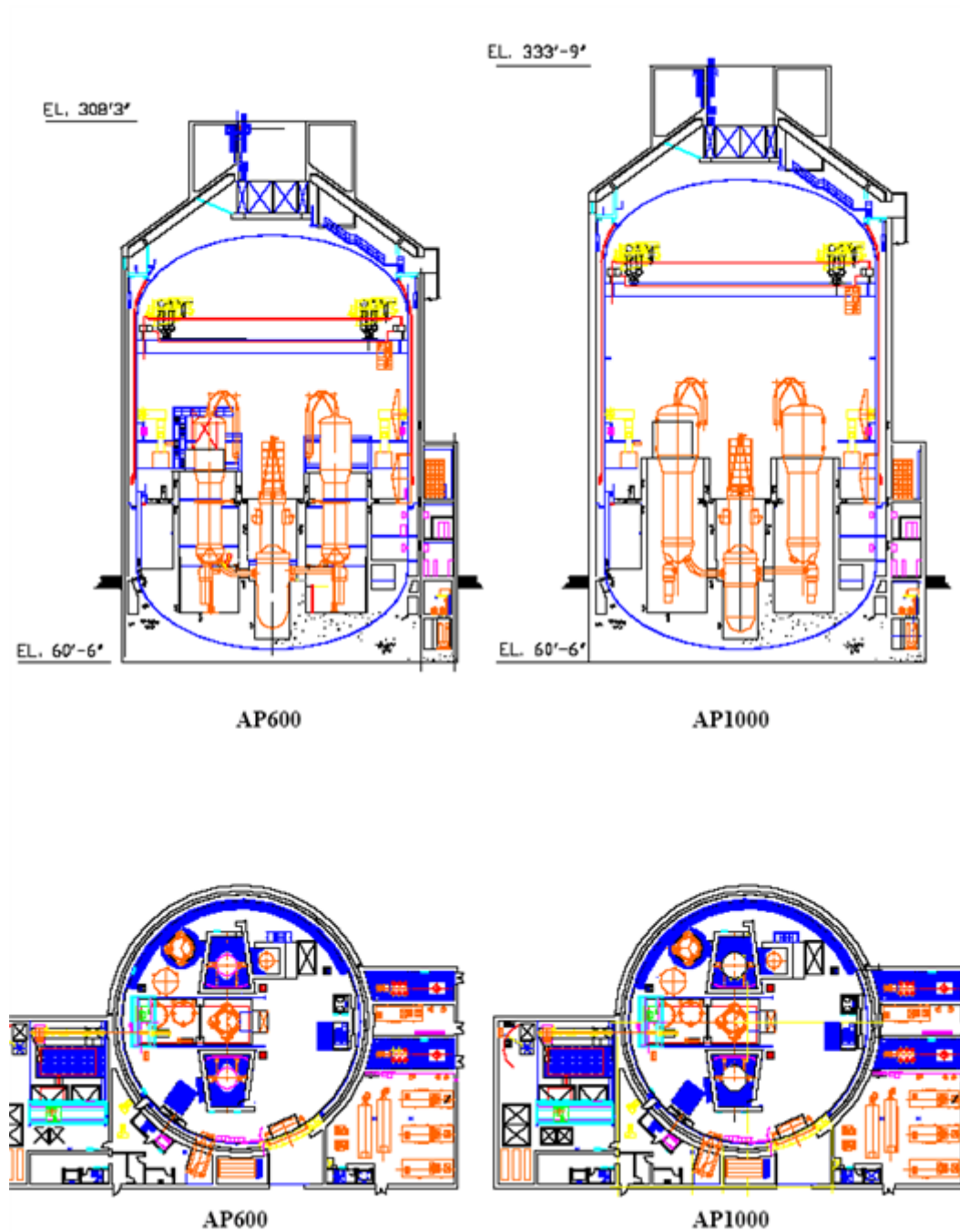
Jako velkou výhodu uvádí společnost takzvanou modulární výstavbu, kdy je elektrárna budována jako stavebnice z dílů, vyrobených jinde, pomocí jeřábů, což šetří čas a peníze, jelikož jednotlivé kusy lze vyrábět souběžně. S návratností pro firmu je to však komplikovanější a údajně se výhody takového způsobu projeví až tehdy, když získá zakázky minimálně na čtyři bloky v jednom regionu. Ve Východní Evropě zatím nemá Westinghouse ani jednu. AP-1000 nedávno narazil na problémy při udělování licencí ve Velké Británii a doma ve Spojených státech (regulátoři mu paradoxně vytkli modulární způsob bezpečnosti, konkrétně u ochranného pouzdra reaktoru, kde podle nich zvyšuje riziko porušení těsnosti). Bezpečnostní systémy projektu AP 1000 lze dělit na aktivní bezpečnostní systémy a pasivní bezpečnostní systémy.[11]



Obrázek 3.2 Modulová výstavba v projektu AP 1000 [6]

<u>Jaderná elektrárna</u>	
Instalovaný výkon	1117 MWe
Účinnost (čistá)	32,70%
Projektová životnost	60 let
<u>Reaktor</u>	
Tepelný výkon	3400 MWt
<u>Aktivní zóna</u>	
Palivo	obohacený uran v podobě UO ₂ (palivo obsahuje vyhořívající absorbátor gadolinium)
Obohacení	4,95%
Počet palivových souborů	157
Počet regulačních tyčí	53
Počet absorpčních tyčí	16
Palivový cyklus	18 měsíců
<u>Systém chlazení reaktoru</u>	
Počet chladících smyček	2
Pracovní tlak	17,2 MPa
Teplota chladiva na vstupu	281 °C
Teplota chladiva na výstupu	316 °C
Průtok chladiva reaktorem	19,8 m ³ /s
<u>Parogenerátor</u>	
Počet na výrobní blok	2
Odběr páry z 1 parogenerátoru	3397,4 t/hod
Tlak páry na výstupu	5,6 MPa
Teplota páry na výstupu	272 °C
<u>Kontejnment – vnitřní obálka</u>	
	- ocel
Průměr (vnitřní)	39,6 m
Tloušťka stěny	4,44 cm
Projektový tlak	0,407 MPa
<u>Kontejnment – vnější obálka</u>	
	- předepjatý beton
Výška	22 m
Průměr (vnitřní)	43 m
Tloušťka stěny	0,9 m (ve válcové části)
<u>Turbosoustrojí</u>	
Počet na výrobní blok	1
Počet dílů turbíny	1 vysokotlaký + 3 nízkotlaké
Otáčky	1500

Tabulka 3.1 Základní technické parametry jaderné elektrárny AP 1000. [2]



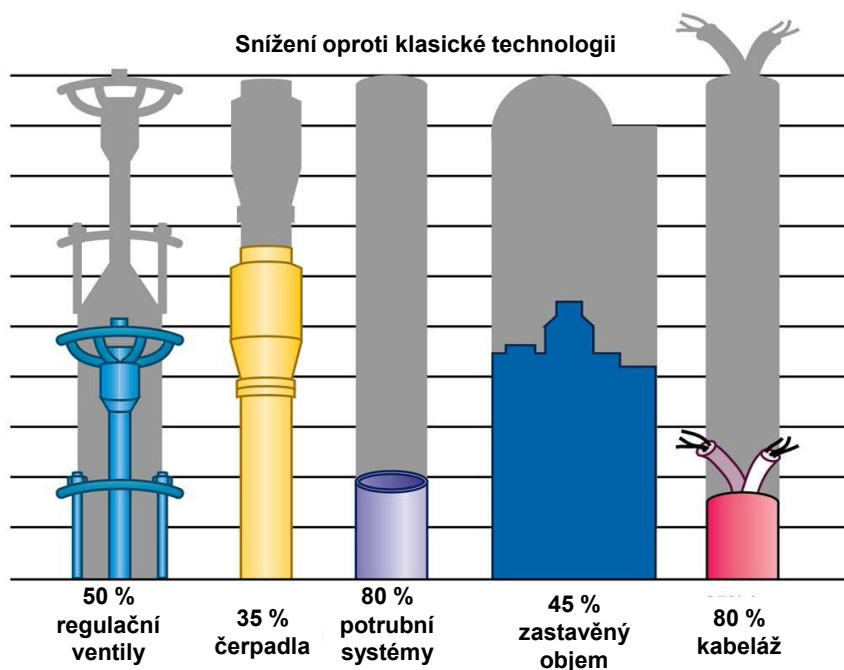
Obrázek 3.3 Zastavěný objem a plocha u AP1000 a porovnání s menší variantou AP600 [8]

Celkově konstrukční řešení jaderné elektrárny AP1000 vychází z projektu AP600, který rovněž vznikl s použitím provozních zkušeností. Oba projekty mají společné značné inovativní prvky především v oblasti zajištění bezpečnosti. AP1000 stejně jako AP600 jsou charakteristické značným snižováním počtu komponent celé jaderné elektrárny, což se např. projevuje u snížení počtu parogenerátorů ze standardních čtyř na dva. Zjednodušování systémů se projevilo především u armatur, potrubí, čerpadel a kabeláže. Z obr. je vidět o kolik procent se snížilo množství různých komponent JE s reaktorem AP1000. Nejvíce ubylo kabeláže a potrubí. U těchto dvou komponent dosáhl pokles množství až o 85 % původního množství, které bylo použito u JE s reaktorem PWR (1000 MW).

Řečí čísel si lze představit zjednodušení systémů následovně:

- Čerpadla – 280 ks (PWR 1000), 180 ks (AP1000)
- Délka potrubí – 33500 m (PWR 1000), 5800 m (AP1000)
- Délka kabeláže – 2,8mil.m (PWR 1000), 366000 m (AP1000)

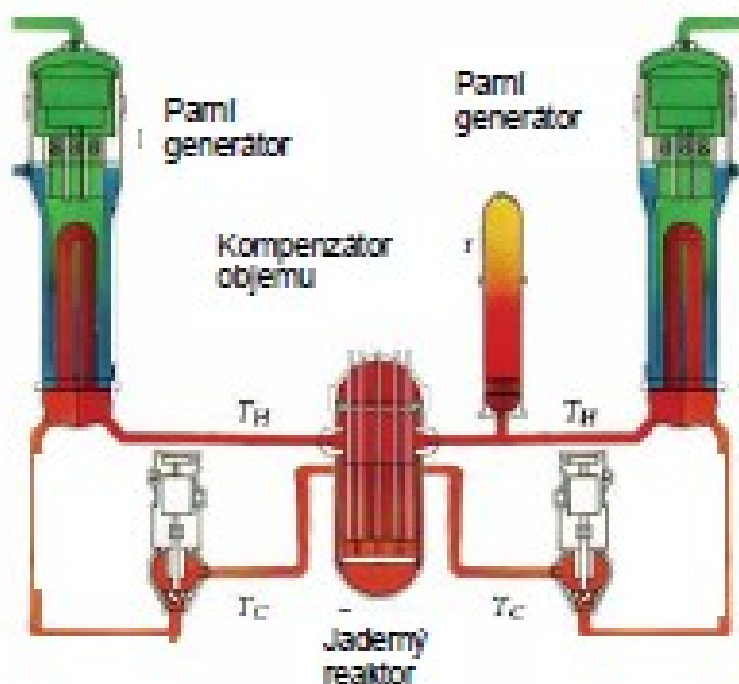
Zjednodušení systémů primárního okruhu oproti JE s reaktorem PWR je tudíž značné, přičemž jsou zajištěny funkce provozních i bezpečnostních systémů.[1]



Obrázek 3.4 Zjednodušení systémů u technologie AP 1000 [7]

3.1 Primární okruh

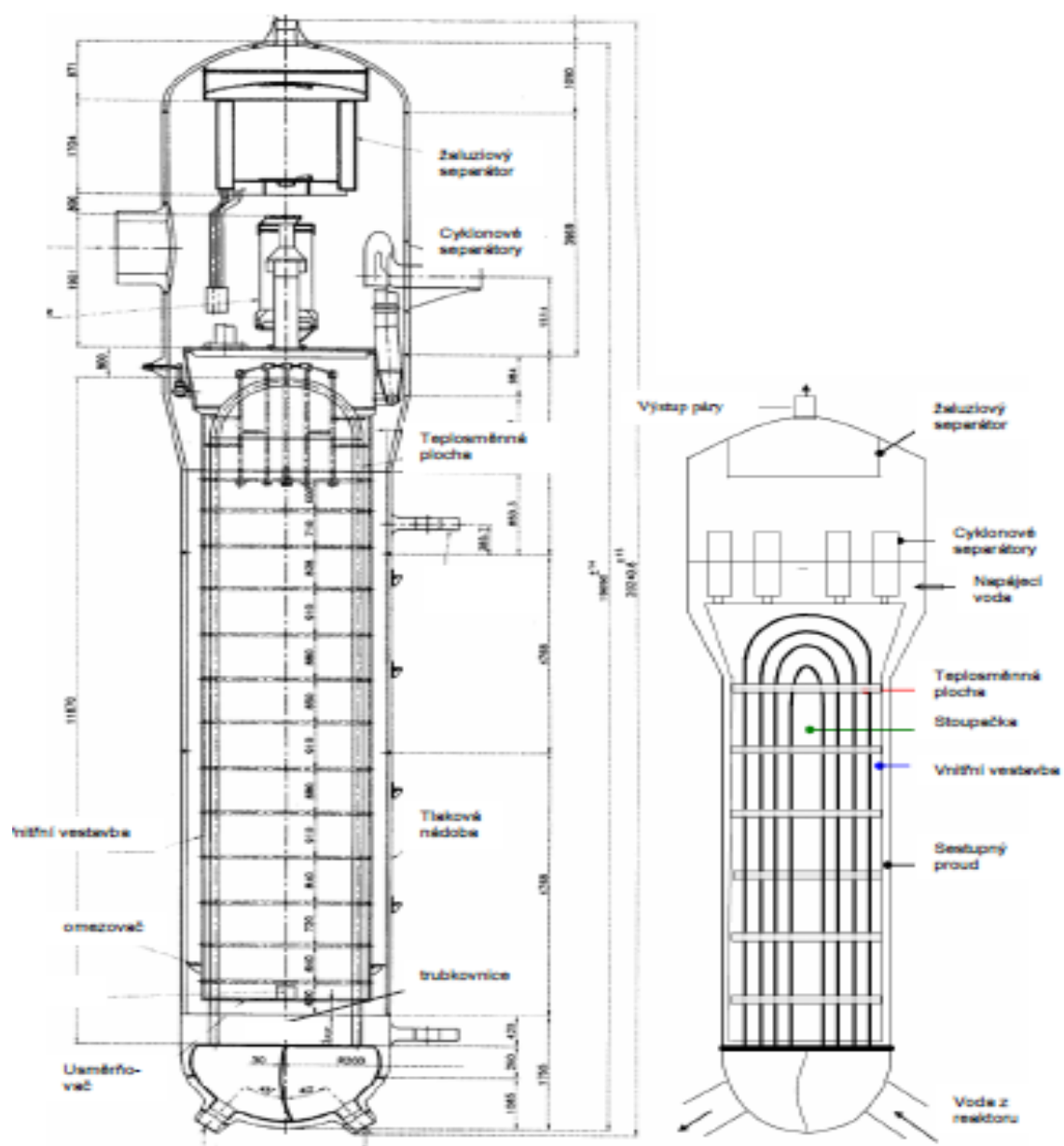
Primární okruh je sestaven z reaktoru (AP1000), parogenerátorů (DELTA 125), kompenzátoru objemu a hlavního cirkulačního čerpadla.



Obrázek 3.5 Zjednodušené schéma primárního okruhu AP 1000 [3]

3.1.1 Parogenerátor DELTA 125

Westinghouse přichází s vertikálním parogenerátorem DELTA 125. Parogenerátor obsahuje 6307 teplosměnných trubek o průměru 15,5 mm. Celková teplosměnná plocha je 7000 m^2 . Je použito u dvou parních generátorů. Parogenerátory jsou velice spolehlivé díky materiálům použitých při výrobě. Materiály použity při výrobě trubek jsou z nerezové oceli. Jedná se o největší parogenerátor, který člověk vyrobil, na výšku má bezmála 25m a jeho hmotnost je cca 690 tun.



Obrázek 3.6 Parogenerátor Delta 125 [6]

Parametr	AP1000	AES-91/99
Typ parogenerátoru	DELTA 125	PGV-1000M
Počet na blok	2	4
Teplota páry na výstupu	272°C	278,5°C
Tlak	5,6 MPa	6,3 MPa
Množství vyrobené páry	3397 t/h	1470 t/h
Průměr tělesa	5,2 m	4,1 m

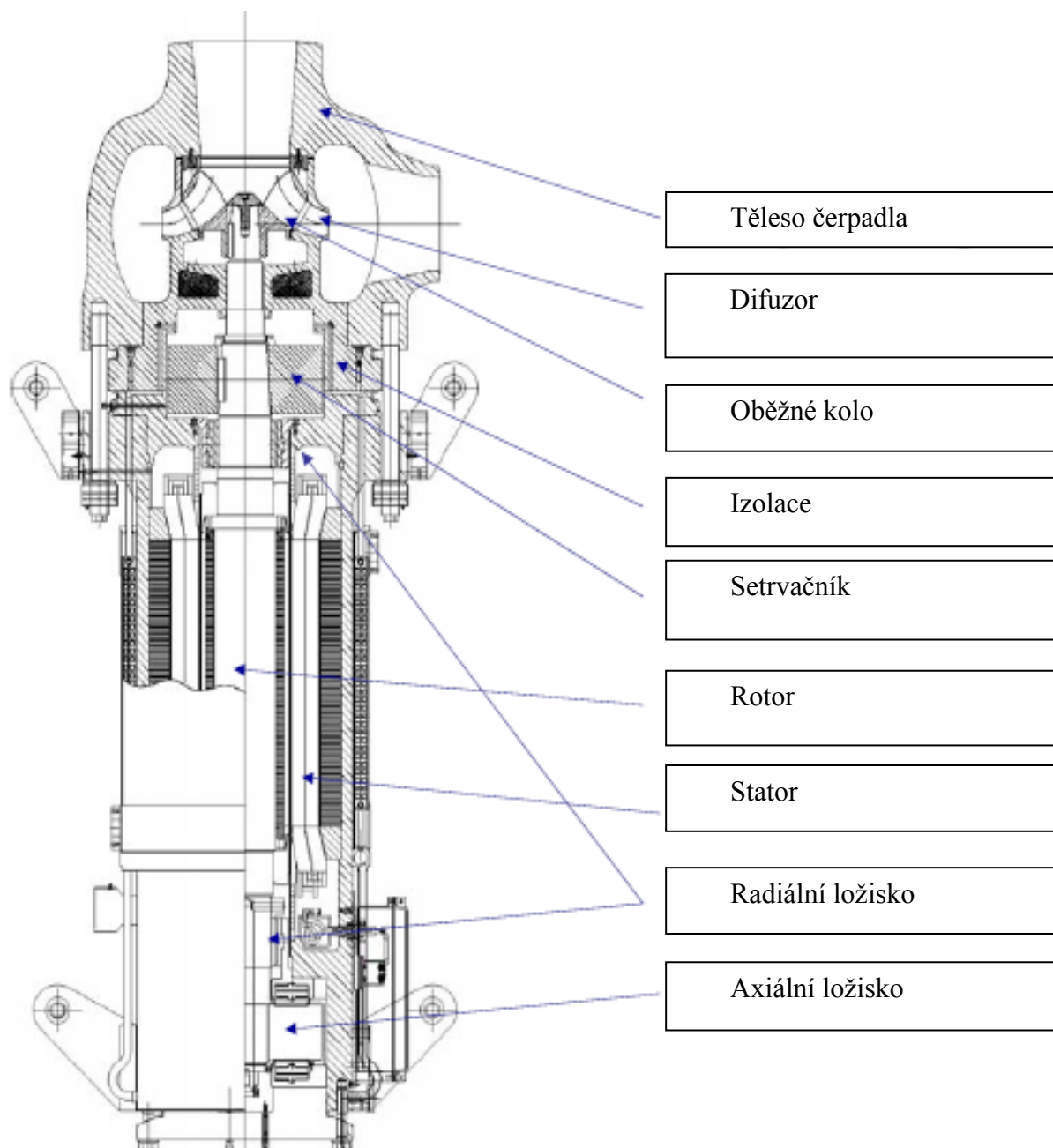
Obrázek 3.7 Porovnání parametrů parogenerátorů Delta 125 a PGV-1000M [3,6]

3.2 Kompenzátor objemu

Kompenzátor objemu navržen v projektu společnosti Westinghouse má veškeré charakteristické rysy jako všechny kompenzátory od této společnosti. Ani nepatrně zvětšený objem neovlivnil bezpečný provoz.

3.2.1 Hlavní cirkulační čerpadlo

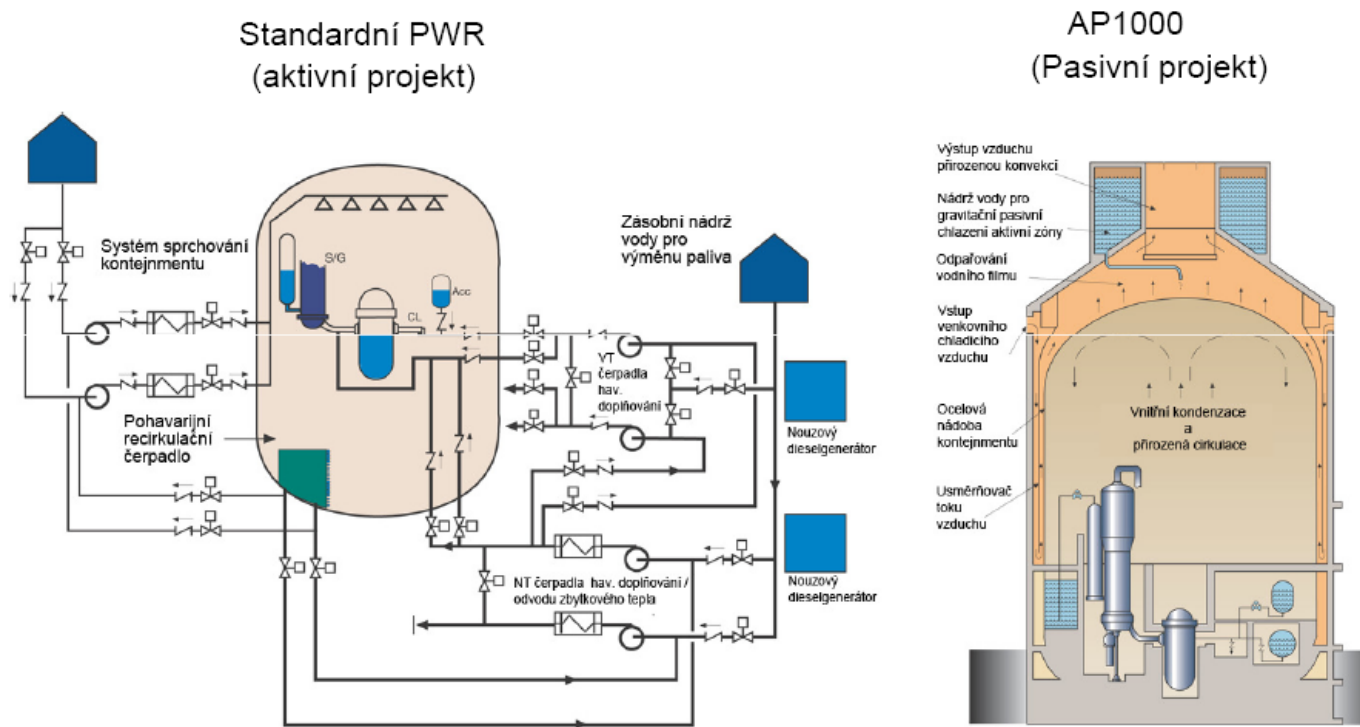
Hlavní cirkulační čerpadlo Westinghouse umístil pod parogenerátor. Jedná se o zapouzdřené bezucpávkové čerpadlo s tlakovým pouzdem, které zajišťuje hermetičnost. Čerpadlo je mazáno vodou, takže nehrozí únik mazacích emulzí do potrubí primárního okruhu. Elektromotor je umístěn pod samotným čerpadlem což umožňuje lepší větrání. V minulosti se od bezucpávkových čerpadel ustoupilo z důvodu malé setrvačnosti. Nové čerpadla pro projekt AP1000 dodává firma Curtiss Wright, která tento problém řeší setrvačником z ochuzeného uranu. [6]



Obrázek 3.8 Hlavní cirkulační čerpadlo AP1000 [11]

3.3 Bezpečnostní systémy

Westinghouse ve svém projektu nabízí aktivní i pasivní bezpečnostní systémy.



Obrázek 3.9 Srovnání projektů se systémem aktivní a pasivní bezpečnosti [6]

3.3.1 Aktivní bezpečnostní systémy

Aktivní bezpečnostní systémy společnosti Westinghouse, jsou systémy, které se nepodílejí na řešení havarijních stavů. Tyto systémy jsou klasifikovány jako systémy pro běžný provoz a k jejich řízení je zapotřebí kvalifikovaných operátorů na rozdíl od pasivních systémů. Systémy spadající do kategorie aktivní jsou konstruovány a provozovány tak, že není vyžadována častá kontrola a není nutná častá údržba a není potřeba častého testování.[6,7,8,11]

3.3.2 Pasivní bezpečnostní systémy

Pasivní bezpečnostní systémy, nepotřebují ke své činnosti elektrickou energii ani zásah operátora. Je výrazně snížena pravděpodobnost havárie vlivem selhání systému nebo lidského faktoru. Westinghouse ujišťuje, že v případě havárie není zapotřebí zásahu člověka po dobu 72 hodin. Pasivní bezpečnostní systémy jsou založeny na fyzikálních principech. U projektu AP1000 ale existuje určitá závislost pasivních systému na těch aktivních a to kvůli armatur, které se aktivují při ztrátě vlastní energie tyto armatury jsou napájen z redundantních baterií. Armatury uvádějí do chodu pasivní systémy. [6,7,8,11]

Hlavní pasivní bezpečnostní systémy jsou: systém hermetičnosti kontejmentu, pasivní systém chlazení kontejmentu a pasivní systém chlazení aktivní zóny.

3.3.2.1 Hermetičnost kontejmentu

Prioritní funkcí kontejmentu je zabránění úniku radioaktivních materiálů do okolí. Jakmile dojde k havárii, hrozí únik těchto látek do okolí proto je kontejment konstruován tak aby tato situace nenastala, z toho plyne, že kontejment je hermetický těsný. [6,7,8,11]

3.3.2.2 Pasivní chlazení kontejmentu

Systém pasivního chlazení kontejmentu slouží k tomu, aby nedošlo k přehřátí a překročení naprojektovaného tlaku v kontejmentu a tím pádem byla narušena jeho hermetičnost. Mezi ocelovou nádobou kontejmentu a vnější železobetonovou obálkou je použit systém přirozené cirkulace vzduchu. Tato přirozená cirkulace vzduchu je v provozu i za běžného provozu. Vzduch je nasáván přes otvory, které jsou umístěny v horní části kontejmentu. Vzduch proudí mezerou, mezi ocelovou nádobou a železobetonovou obálkou, směrem dolů a poté směřuje nahoru mezi ocelovou nádobou a přepážkou. Vzduchová přepážka nám zajišťuje, že studený vzduch ochlazuje ocelovou nádobu kontejmentu po celém obvodu, nebýt této přepážky vzduch by se držel pouze v horní části kontejmentu a tudíž by nic nechlادil. [6,7,8,11]

3.3.2.3 Pasivní chlazení aktivní zóny

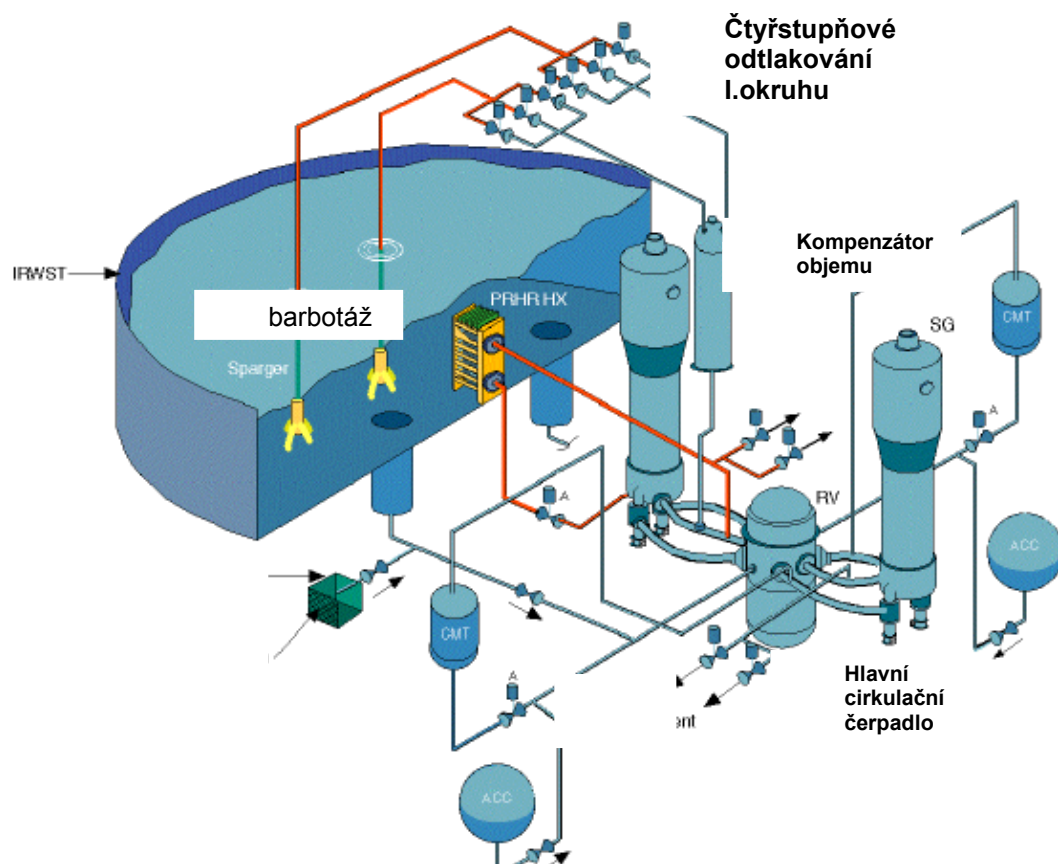
Úkolem pasivního chlazení kontejmentu je zajištěná odvodu zbytkového tepla z reaktoru a bezpečné chlazení aktivní zóny. Odvod zbytkového tepla z reaktoru zajišťují pasivní výměníky tepla a zásobníky vody pro výměnu paliva, které jsou umístěny v kontejmentu (slouží i jako zásobníky vody při havárii typu LOCA). Bezpečné chlazení aktivní zóny mají na starost přídavné nádrže pro chlazení aktivní zóny, recirkulace vzduchu uvnitř kontejmentu, hydro-akumulátory a také zásobníky vody pro výměnu paliva uvnitř kontejmentu. [6,7,8,11]

Havárie typu LOCA

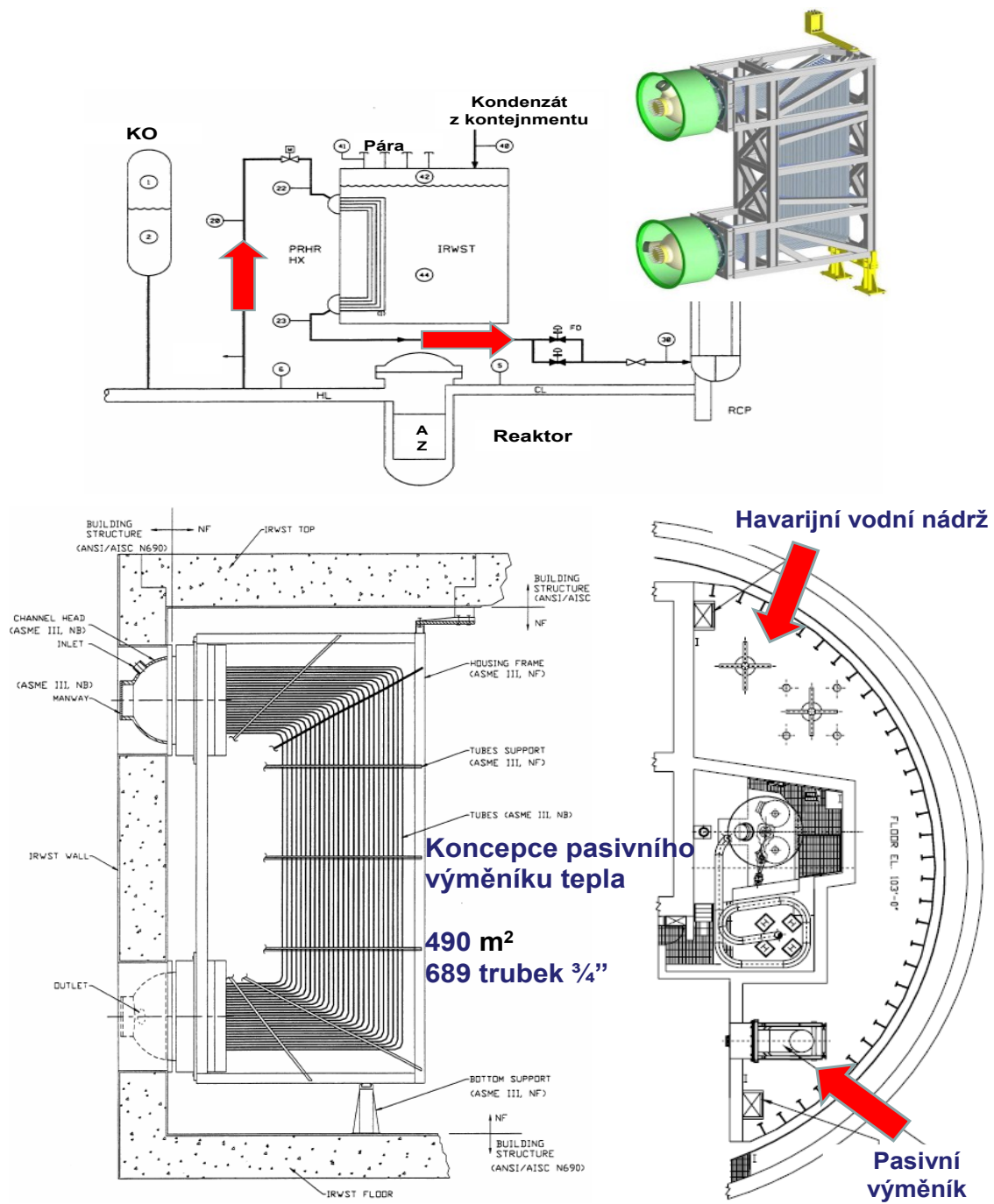
V případě prasknutí větve primárního okruhu dojde k náhlému poklesu tlaku v potrubí. Zároveň chladicí médium uniká z větve primárního okruhu, což znamená, že jaderný reaktor nemůže být dostatečně chlazen. Tomuto typu havárie se říká LOCA. Projekt AP1000 řeší havárii typu LOCA skrze pasivní systém chlazení aktivní zóny. V návrhu reaktoru AP1000 je obsaženo několik prvků zvyšujících výrobu energie a zároveň bezpečnost pracovníků jako:

- Osmnáctiměsíční palivový cyklus vedoucí k vyšší dostupnosti a nižším celkovým nákladům na palivo,
- výrazně nižší požadavky na údržbu, montáž lešení, testování a inspekce,
- menší vystavení záření a menší množství odpadu z elektrárny ,

- projekt s garantovanou šedesátiletou životností. [6,7,8,11]



Obrázek 3.10 3D model pasivního systému chlazení aktivní zóny a odvodu zbytkového tepla [8]



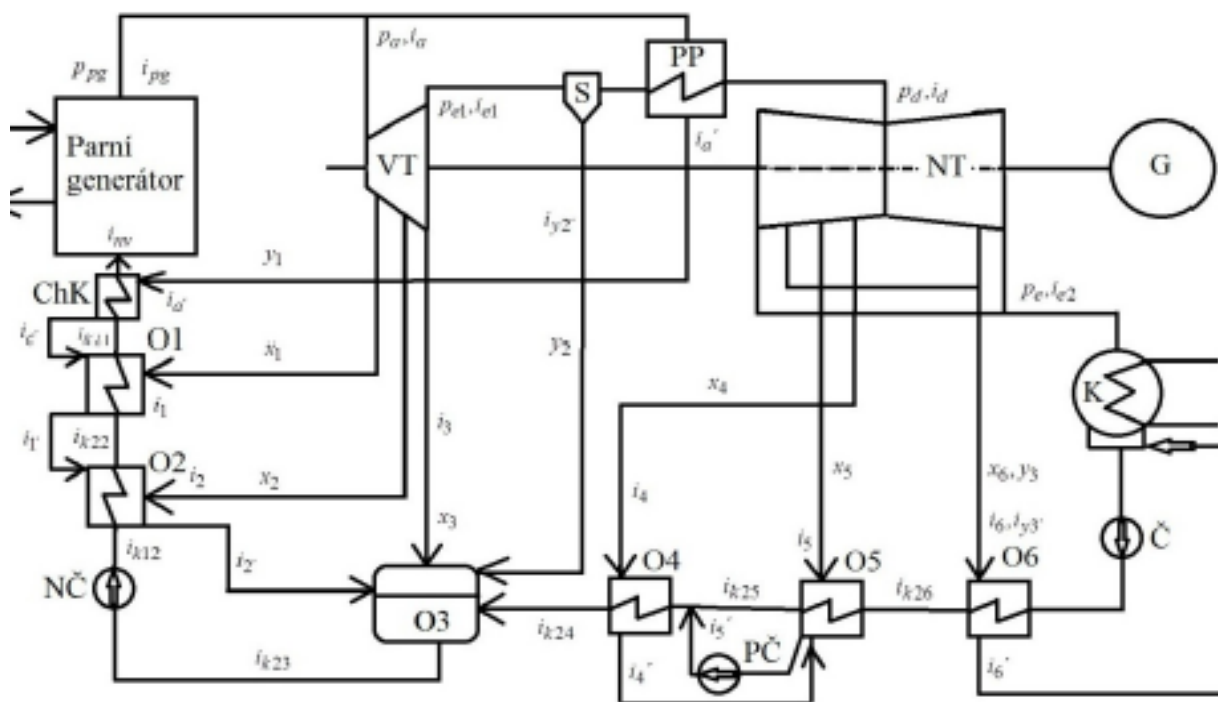
Obrázek 3.11 Umístění pasivního výměníku tepla a havarijní nádrže v kontejnmentu a jeho funkce [8]

4 Výpočet

4.1 Výpočet účinnosti bloku projektu MIR1200

Pro danou modelovou koncepci zjednodušeně vypočtete účinnost bloku z parametrů sekundárního okruhu.

Pro výpočet entalpií, tlaků a teplot jsem použil výpočetní program EES.



Obrázek 4.1 Schéma sekundárního okruhu jaderné elektrárny [15]

Výtlačný tlak napájecího čerpadla (uvažovaná 30% ztráta v parním generátoru):

$$p_n = p_{pg} * 1,3 = 5,890 * 1,3 = 7,657 \text{ MPa} \quad (1)$$

Tlak admisní páry na vstupu do VT dílu turbíny (uvažovaná ztráta 2,5% z tlaku parního generátoru):

$$p_a = p_{pg} * (1 - 0,025) = 5,890 * 0,975 = 5,740 \text{ MPa} \quad (2)$$

Tlak za VT dílem turbíny navazuje na teplotu sytosti páry v odplyňovači

t_{od} , která je 165°C :

$$p_{o3} = p_{o3}(x = 0, t_{od}) = 0,778 \text{ MPa} \quad (3)$$

Tlak za VT částí turbíny:

$$p_{e1} = p_{o3} = 0,778 \text{ MPa} \quad (4)$$

Tlak za posledním stupněm NT části vypočteme z tlaku kondenzátoru a odečtením tlakových ztrát mezi kondenzátorem a turbínou, které činí 10%:

$$p_{e2} = \frac{p_k}{1 - 0,1} = \frac{3,9}{0,9} = 4,333 \text{ kPa} \quad (5)$$

Tlak na vstupu NT části turbíny (uvažujeme tlakovou ztrátu v přehříváku a v odlučovači vlhkosti 15%):

$$p_d = p_{e1} * (1 - 0,15) = 0,778 * 0,85 = 0,660 \text{ MPa} \quad (6)$$

$$t_{k21} = 225^{\circ}\text{C}$$

$$t_{k22} = 195^{\circ}\text{C}$$

$$t_{k23} = 165^{\circ}\text{C}$$

$$t_{k24} = 130^{\circ}\text{C}$$

$$t_{k25} = 100^{\circ}\text{C}$$

$$t_{k26} = 70^{\circ}\text{C}$$

Teploty sytosti páry (počítáme s teplotními rozdíly u VT a NT ohřívácích:

VT (3°C), NT (2°C)

$$t_{o1} = t_{k21} + 3 = 225 + 3 = 228^{\circ}\text{C} \quad (7)$$

$$t_{o2} = t_{k22} + 3 = 195 + 3 = 198^{\circ}\text{C}$$

$$t_{o3} = t_{k23} = 165^{\circ}\text{C}$$

$$t_{o3} = t_{k24} = 130^{\circ}\text{C}$$

$$t_{o5}=t_{k24}+2=100+2=102^{\circ}\text{C}$$

$$t_{o6}=t_{k26}+2=70+2=72^{\circ}\text{C}$$

Tlaky v místech odběru na straně u regeneračního ohříváku:

$$p_1 \Rightarrow p_1(t_{o1}, x=0) = 2,695 \text{ MPa}$$

$$p_2 \Rightarrow p_2(t_{o2}, x=0) = 1,489 \text{ MPa}$$

$$p_3 \Rightarrow p_3(t_{o3}, x=0) = 0,699 \text{ MPa}$$

$$p_4 \Rightarrow p_4(t_{o4}, x=0) = 0,287 \text{ MPa}$$

$$p_5 \Rightarrow p_5(t_{o5}, x=0) = 0,108 \text{ MPa}$$

$$p_6 \Rightarrow p_6(t_{o6}, x=0) = 0,033 \text{ MPa}$$

Skutečné tlaky v místech odběru mezi regeneračními ohříváky stanovíme přičtením tlakové ztráty v potrubí, která činí 10% :

$$p_{ox} = \frac{p_x}{1-0,1} \quad (8)$$

$$p_{o1} = \frac{p_1}{1-0,1} = \frac{2,695}{0,9} = 2,994 \text{ MPa}$$

$$p_{o2} = \frac{p_2}{1-0,1} = \frac{1,489}{0,9} = 1,654 \text{ MPa}$$

$$p_{o3} = \frac{p_3}{1-0,1} = \frac{0,699}{0,9} = 0,776 \text{ MPa}$$

$$p_{o4} = \frac{p_4}{1-0,1} = \frac{0,287}{0,9} = 0,318 \text{ MPa}$$

$$p_{o5} = \frac{p_5}{1-0,1} = \frac{0,108}{0,9} = 0,120 \text{ MPa}$$

$$p_{o6} = \frac{p_6}{1-0,1} = \frac{0,033}{0,9} = 0,0366 \text{ MPa}$$

Entalpie syté páry kapaliny na straně sacího potrubí čerpadla:

$$i_s \Rightarrow i_s(p_3, x=0) = 697,18 \text{ kJ*kg}^{-1}$$

Entalpie kondenzátu za čerpadlem při tlaku p_n :

$$i_n \Rightarrow i_n(p_n, x=0) = 705,08 \text{ kJ*kg}^{-1}$$

Teoretický nárůst entalpie v čerpadle:

$$i_{n-t} = i_n - i_s = 705,08 - 697,18 = 7,9 \text{ kJ*kg}^{-1} \quad (9)$$

Skutečný nárůst entalpie v čerpadle (uvažovaná účinnost čerpadla $\eta_c=0,85$):

$$i_{n-sk} = \frac{i_{n-t}}{\eta_c} = \frac{7,9}{0,85} = 9,29 \text{ kJ*kg}^{-1} \quad (10)$$

Entalpie za napájecím čerpadlem:

$$i_{k12} = i_s + i_{n-sk} = 697,18 + 9,29 = 706,47 \text{ kJ*kg}^{-1} \quad (11)$$

$$i_{k21} \Rightarrow i_{k21}(p_n, t_{k21}) = 968,13 \text{ kJ*kg}^{-1}$$

$$i_{k22} \Rightarrow i_{k22}(p_n, t_{k22}) = 832,86 \text{ kJ*kg}^{-1}$$

$$i_{k23} \Rightarrow i_{k23}(p_n, t_{k23}) = 697,08 \text{ kJ*kg}^{-1}$$

$$i_{k24} \Rightarrow i_{k24}(x = 0, t_{k24}) = 546,33 \text{ kJ*kg}^{-1}$$

$$i_{k25} \Rightarrow i_{k25}(x = 0, t_{k25}) = 419,11 \text{ kJ*kg}^{-1}$$

$$i_{k26} \Rightarrow i_{k26}(x = 0, t_{k26}) = 292,99 \text{ kJ*kg}^{-1}$$

Entalpie admisní páry před VT dílem turbíny:

$$i_{at} \Rightarrow i_{at}(p_{pg}, p_a, i_{pg}) = 2781,14 \text{ kJ*kg}^{-1}$$

Entalpie admisní páry na vstupu do VT dílu turbíny po odečtení ztráty na regulačních ventilech:

$$i_a = i_{at} - i_{zt} = 2781,14 - 12,5 = 2768,64 \text{ kJ*kg}^{-1} \quad (12)$$

Entalpie páry za přehřívákem páry:

$$i_a' = i_a'(p_a, x=0) = 1199 \text{ kJ*kg}^{-1}$$

Entalpie páry před NT dílem turbíny:

$$i_{dt} \Rightarrow i_{dt}(p_d, x=1) = 2761 \text{ kJ*kg}^{-1}$$

Entalpie páry při vstupu do NT dílu turbíny s uvažovanou ztrátou na regulačních ventilech:

$$i_d = i_{dt} - i_{zt} = 2761 - 12,5 = 2748,5 \text{ kJ*kg}^{-1} \quad (13)$$

Entalpie páry na výstupu z parního generátoru:

$$i_{pg} \Rightarrow i_{pg}(p_{pg}, x=1) = 2644,12 \text{ kJ*kg}^{-1}$$

Entalpie páry za posledním stupněm VT dílu části turbíny:

$$i_{e1} = i_{03}$$

Entalpie páry za posledním stupněm NT části turbíny pro odloučení vlhkosti:

$$i_{e2t} \Rightarrow i_{e2t}(p_{06}, p_{e2}, i_{06}) = 2135,8 \text{ kJ*kg}^{-1}$$

Po odečtení ztráty výstupní rychlosti (30 kJ*kg^{-1}) dostaneme skutečnou entalpii páry za posledním stupněm NT dílu turbíny:

$$i_{e2} = i_{e2t} - i_{zt2} = 2135,8 - 30 = 2105,8 \text{ kJ*kg}^{-1} \quad (14)$$

Entalpie napájecí vody:

$$i_{nv} \Rightarrow i_{nv}(p_n, t_{nv}) = 976,22 \text{ kJ*kg}^{-1}$$

Entalpie páry v místech odběru VT části turbíny s účinností $\eta=0,8$:

$$i_{01} \Rightarrow i_{01}(p_a, p_{01}, i_a) = 2671,15 \text{ kJ*kg}^{-1}$$

$$i_{02} \Rightarrow i_{02}(p_a, p_{02}, i_a) = 2587,28 \text{ kJ*kg}^{-1}$$

$$i_{03} \Rightarrow i_{03}(p_a, p_{03}, i_a) = 2487,32 \text{ kJ*kg}^{-1}$$

Entalpie páry v místech odběru NT části turbíny:

$$i_{04} \Rightarrow i_{04}(p_d, p_{04}, i_d) = 2634,63 \text{ kJ*kg}^{-1}$$

$$i_{05} \Rightarrow i_{05}(p_d, p_{05}, i_d) = 2499,60 \text{ kJ*kg}^{-1}$$

$$i_{06} \Rightarrow i_{06}(p_d, p_{06}, i_d) = 2356,79 \text{ kJ*kg}^{-1}$$

Entalpie topné látky na vstupu do regeneračního ohříváku:

$$i_1 \Rightarrow i_1(p_{01}, p_1, i_{01}) = 2651,63 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$i_2 \Rightarrow i_2(p_{02}, p_2, i_{02}) = 2568,65 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$i_3 \Rightarrow i_3(p_{03}, p_3, i_{03}) = 2470,03 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$i_4 \Rightarrow i_4(p_{04}, p_4, i_{04}) = 2616,47 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$i_5 \Rightarrow i_5(p_{05}, p_5, i_{05}) = 2483,48 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$i_6 \Rightarrow i_6(p_{06}, p_6, i_{06}) = 2341,52 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Entalpie topné látky na výstupu z regeneračního ohříváku:

$$i_1' \Rightarrow i_1'(p_1, x=0) = 980,7 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$i_2' \Rightarrow i_2'(p_2, x=0) = 843,2 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$i_3' \Rightarrow i_3'(p_3, x=0) = 697,0 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$i_4' \Rightarrow i_4'(p_4, x=0) = 555,1 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$i_5' \Rightarrow i_5'(p_5, x=0) = 426,5 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$i_6' \Rightarrow i_6'(p_6, x=0) = 298,4 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Entalpie vody za chladičem kondenzátu:

$$i_c' = i_a' \cdot \frac{i_{nv} - i_{k21}}{y_1 \cdot \eta_c} = 1199 \cdot \frac{976,22 - 968,13}{0,06 \cdot 0,97} = 1059,99 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (15)$$

Entalpie odloučené vlhkosti v odlučovači vlhkosti:

$$i_{y2}' \Rightarrow i_{y2}'(p_{e1}, x=0) = 716,1 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Entalpie odloučené vlhkosti v NT dílu turbíny:

$$i_{y3}' \Rightarrow i_{y3}'(p_{06}, x=0) = 312,4 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Entalpie kondenzátu pro tlak p_k :

$$i_k' \Rightarrow i_k'(p_k, x=0) = 119,5 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Množství odběrové páry nutné pro provoz regeneračního ohříváku O1 [14]:

$$x_1 = \frac{i_{k21} - i_{k22}}{i_2 - i_2' \cdot \eta_{ov}} - \frac{y_1 \cdot (i_c' - i_1')}{(i_1 - i_1')} = \frac{968,13 - 706,47}{(2651,63 - 980,7) \cdot 0,97} - \frac{0,06 \cdot (1059,997 - 980,7)}{(2651,63 - 980,7)} = 0,0806 \quad (16)$$

Množství odběrové páry nutné pro provoz regeneračního ohříváku O2 [14]:

$$x_2 = \frac{i_{k22} - i_{k12}}{i_2 - i_2' \cdot \eta_{ov}} - \frac{(x_1 + y_1) \cdot (i_1' - i_2')}{(i_2 - i_2')} = \frac{832,86 - 706,47}{(2568,65 - 843,2) \cdot 0,97} - \frac{(0,0806 + 0,06) \cdot (980,7 - 843,2)}{(2568,65 - 843,2)} = 0,0596 \quad (17)$$

Množství odběrové páry nutné pro provoz regeneračního ohříváku O3 [14]:

$$x_3 = \frac{(1 - x_1 - x_2 - y_1 - y_2) \cdot \frac{i_{k23} - i_{k24}}{\eta_{o3}}}{i_3 - i_{k23} + \frac{i_{k23} - i_{k24}}{\eta_{o3}}} - \frac{(x_1 + x_2 + y_1) \cdot (i_2' - i_{k23}) + y_2 \cdot (i_2' - i_{k23})}{i_3 - i_{k23} + \frac{i_{k23} - i_{k24}}{\eta_{o3}}} \quad (18)$$

$$x_3 = \frac{(1 - 0,0806 - 0,0596 - 0,06 - 0,09) \cdot \frac{697,08 - 546,33}{0,98}}{2470,03 - 697,08 + \frac{697,08 - 546,33}{0,98}} - \frac{(0,0806 + 0,0596 + 0,06) \cdot (843,2 - 697,08) + 0,09 \cdot (716,1 - 697,08)}{2470,03 - 697,08 + \frac{697,08 - 546,33}{0,98}} =$$

$$x_3 = 0,0474$$

Množství odběrové páry nutné pro provoz regeneračního ohříváku O4 [14]:

$$x_4 = \frac{(1 - x_1 - x_2 - x_3 - y_1 - y_2) \cdot (i_{k24} - i_{k25})}{(i_4 - i_4') \cdot \eta_{o4}} \quad (19)$$

$$x_4 = \frac{(1 - 0,0806 - 0,0596 - 0,0474 - 0,06 - 0,09) \cdot (546,33 - 419,11)}{(2616,47 - 555,1) \cdot 0,98}$$

$$x_4 = 0,0417$$

Množství odběrové páry nutné pro provoz regeneračního ohřívačku O5 [14]:

$$x_5 = \frac{(1-x_1-x_2-x_3-x_4-y_1-y_2) \cdot \frac{(i_{k25}-i_{k26})}{\eta_{04}}}{i_5-i'_5 + \frac{(i_{k25}-i_{k26})}{\eta_{04}}} - \frac{x_4 \cdot (i'_4-i'_5)}{i_5-i'_5 + \frac{(i_{k25}-i_{k26})}{\eta_{04}}} \quad (20)$$

$$x_5 = \frac{(1-0,0806-0,0596-0,0474-0,0417-0,06-0,09) \cdot \frac{(419,11-292,99)}{0,98}}{2483,48-426,5 + \frac{(419,11-292,99)}{0,98}} - \frac{0,0417 \cdot (555,1-426,5)}{2483,48-426,5 + \frac{(419,11-292,99)}{0,98}}$$

$$x_5 = 0,0341$$

Množství odběrové páry nutné pro provoz regeneračního ohřívačku O6 [14]:

$$x_6 = \frac{(1-x_1-x_2-x_3-x_4-x_5-y_1-y_2) \cdot (i_{k26}-i'_k)}{(i_6-i'_6) \cdot \eta_{04}} - \frac{y_3 \cdot (i_{y3}'-i'_6)}{i_6-i'_6} \quad (21)$$

$$x_6 = \frac{(1-0,0806-0,0596-0,0474-0,0417-0,0341-0,06-0,09) \cdot (292,99-119,5)}{(2341,52-298,4) \cdot 0,98} - \frac{0,023 \cdot (312,4-298,4)}{2341,52-298,4}$$

$$x_6 = 0,0507$$

Množství páry nutné pro provoz turbíny [14]:

$$Q_{mp} = \frac{P_{te}}{i_{pg}-i_{nv}} = [t \cdot h^{-1}] \quad (21)$$

kde: P_{te} je tepelný výkon jaderného reaktoru [W]

i_{pg} je entalpie páry na výstupu z parogenerátoru [$J \cdot kg^{-1}$]

i_{nv} je entalpie napájecí vody [$J \cdot kg^{-1}$]

$$Q_{mp} = \frac{3200 \cdot 10^6}{(2644,12-976,22) \cdot 10^3} = 1918,58 \text{ kg} \cdot s^{-1} = 6907 \text{ t} \cdot h^{-1}$$

Celkové množství páry, která proudí různými částmi oběhu [14]:

$$x_j = \frac{Q_{mox}}{Q_{mp}} \Rightarrow Q_{mox} = x_j \cdot Q_{mp} \quad [kg \cdot s^{-1}, t \cdot h^{-1}] \quad (22)$$

kde: x_j jsou jednotlivá množství odběrové páry nutné pro provoz regeneračních ohřívačů [-]

Q_{mp} je množství páry nutné pro provoz turbíny [$kg \cdot s^{-1}, t \cdot h^{-1}$]

Po dosazení jednotlivých x do rovnice (22) získáme [14]:

Množství páry proudící regeneračním ohřívačem (O1-O6):

$$Q_{\text{molI}} = x_1 * Q_{\text{mp}} = 0,0806 * 1918,58 = 154,64 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} = 556,7 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$$

$$Q_{\text{molII}} = x_2 * Q_{\text{mp}} = 0,0596 * 1918,58 = 114,35 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} = 411,65 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$$

$$Q_{\text{molIII}} = x_3 * Q_{\text{mp}} = 0,0474 * 1918,58 = 90,94 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} = 327,39 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$$

$$Q_{\text{molIV}} = x_4 * Q_{\text{mp}} = 0,0417 * 1918,58 = 80,00 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} = 288,02 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$$

$$Q_{\text{molV}} = x_5 * Q_{\text{mp}} = 0,0341 * 1918,58 = 65,42 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} = 235,53 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$$

$$Q_{\text{molVI}} = x_6 * Q_{\text{mp}} = 0,0507 * 1918,58 = 97,27 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} = 350,18 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$$

$$y_j = \frac{Q_{\text{moyx}}}{Q_{\text{mp}}} \Rightarrow Q_{\text{moyx}} = y_j * Q_{\text{mp}} \text{ [kg} \cdot \text{s}^{-1}, \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}] \quad (23)$$

kde: y_j je množství odběrové páry mezi VT a NT stupněm pro přehřívák, množství odloučené vlhkosti z odlučovače vlhkosti,

Q_{mp} je množství páry nutné pro provoz turbíny [$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$, $\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$]

Po dosazení do rovnice (23) získáme:

Množství páry proudící chladičem kondenzátu:

$$Q_{\text{moy1}} = y_1 * Q_{\text{mp}} = 0,06 * 1918,58 = 115,12 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} = 414,413 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$$

Množství separované vody v odlučovači vlhkosti:

$$Q_{\text{moy2}} = y_2 * Q_{\text{mp}} = 0,09 * 1918,58 = 172,67 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} = 621,62 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$$

Množství odloučené vody v NT části turbíny:

$$Q_{\text{moy3}} = y_3 * Q_{\text{mp}} = 0,023 * 1918,58 = 44,13 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} = 158,86 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$$

Práce 1kg páry, která proudí turbínou [14]:

$$\begin{aligned}
 w_i = & (1 - y_1) * (i_a - i_{o1}) + (1 - x_1 - y_1) * (i_{o1} - i_{o2}) + (1 - x_1 - x_2 - y_1) * (i_{o2} - i_{o3}) + \\
 & (1 - x_1 - x_2 - x_3 - y_1) * (i_{o3} - i_{e1}) + (1 - x_1 - x_2 - x_3 - y_1 - y_2) * (i_d - i_{o4}) + (1 - x_1 - x_2 - x_3 - x_4 - y_1 - y_2) * \\
 & (i_{o4} - i_{o5}) + (1 - x_1 - x_2 - x_3 - x_4 - x_5 - y_1 - y_2) * (i_{o5} - i_{o6}) + (1 - x_1 - x_2 - x_3 - x_4 - x_5 - x_6 - y_1 - y_2 - y_3) * \\
 & (i_{o6} - i_{e2})
 \end{aligned}
 \tag{24}$$

kde: y_1 ..je množství odběrové páry mezi VT a NT stupněm pro přehřívák [1]

y_2 ..je množství odloučené vlhkosti z odlučovače vlhkosti [1]

y_3 .. poměrné odloučení vlhkosti v NT dílu [1]

$x_1 - x_6$..množství odběrové páry nutné pro provoz regeneračního ohříváku O1-O6 [1]

$i_{o1} - i_{o3}$..entalpie páry v místech odběru VT části turbíny [$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$]

$i_{o4} - i_{o6}$..entalpie páry v místech odběru NT části turbíny [$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$]

i_a ..entalpie admisní páry na vstupu do VT dílu turbíny [$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$] (12)

i_{e1} ..entalpie páry za posledním stupněm VT části turbíny [$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$]

i_{e2} ..entalpie páry za posledním stupněm NT dílu turbíny [$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$] (14)

i_d ..entalpie páry při vstupu do NT dílu turbíny [$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$] (13)

$$\begin{aligned}
 w_i = & (1-0,06)*(2768,64-2671,15)+(1-0,0806-0,06)*(2671,15-2587,28)+(1-0,0806-0,0596- \\
 & 0,06)*(2587,32-2487,32)+(1-0,0806-0,0596-0,0474-0,06)*(2487,32-2487,32)+(1-0,0806- \\
 & 0,0596-0,0474-0,06-0,09)*(2748,5-2634,63)+(1-0,0806-0,0596-0,0474-0,0417-0,06- \\
 & 0,09)*(2634,63-2499,6)+(1-0,0806-0,0596-0,0474-0,0417-0,0341-0,06-0,09)*(2499,6- \\
 & 2356,79)+(1-0,0806-0,0596-0,0474-0,0417-0,0341-0,0507-0,06-0,09-0,023)*(2356,79- \\
 & 2105,8)
 \end{aligned}$$

$$w_i = 614,422 \text{ [kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$$

Stanovení účinností jaderné elektrárny:

Vnitřní výkon turbíny:

$$P_i = Q_{mp} * w = [W, MW] \quad (25)$$

kde: Q_{mp} ..množství páry potřebné pro provoz turbíny [$kg \cdot s^{-1}$, $t \cdot h^{-1}$] (21)

w .. práce 1kg páry, která proudí turbínou [$kJ \cdot kg^{-1}$] (24)

$$P_i = Q_{mp} * w = 1918,58 * 614,422 * 10^3 = 1178817761 \text{ W} = 1178,82 \text{ MW}$$

Elektrický výkon na svorkách generátoru:

$$P_{sv} = P_i * \eta_m * \eta_g = [W, MW] \quad (26)$$

kde: P_i .. je vnitřní výkon turbíny [W, MW] (25)

η_m .. mechanická účinnost turbíny [-]

η_g .. účinnost generátoru [-]

$$P_{sv} = P_i * \eta_m * \eta_g = 1178,82 * 10^6 * 0,95 * 0,99 = 1108680210 \text{ W} = 1108,68 \text{ MW}$$

Tepelná účinnost oběhu:

$$\eta_{tsv} = \frac{P_{sv}}{Q_{mp} * (i_{pg} - i_{nv})} = [\%] \quad (27)$$

kde: P_{sv} ..je svorkový výkon generátoru [W, MW] (26)

Q_{mp} ..množství páry potřebné pro provoz turbíny [$kg \cdot s^{-1}$, $t \cdot h^{-1}$] (21)

i_{pg} je entalpie páry na výstupu z generátoru [$J \cdot kg^{-1}$]

i_{nv} je entalpie napájecí vody [$J \cdot kg^{-1}$]

$$\eta_{tsv} = \frac{P_{sv}}{Q_{mp} * (i_{pg} - i_{nv})} = \frac{1108,68 * 10^6}{1918,58 * (2644,12 - 976,22) * 10^3} = 0,3265 = 32,65\%$$

Celková účinnost jaderné elektrárny bez hodnoty vlastní spotřeby:

$$\eta_{tc} = \eta_{tsv} * \eta_{pg} * \eta_p = [\%] \quad (28)$$

kde: η_{tsv} ..je celková tepelná účinnost oběhu [-] (27)

η_{pg} .. je účinnost parního generátoru [-]

η_p .. je účinnost potrubí [-]

$$\eta_{tc} = \eta_{tsv} * \eta_{pg} * \eta_p = 0,3265 * 0,95 * 0,99 = 0,3178 = 31,78\%$$

Čistý výkon jaderné elektrárny:

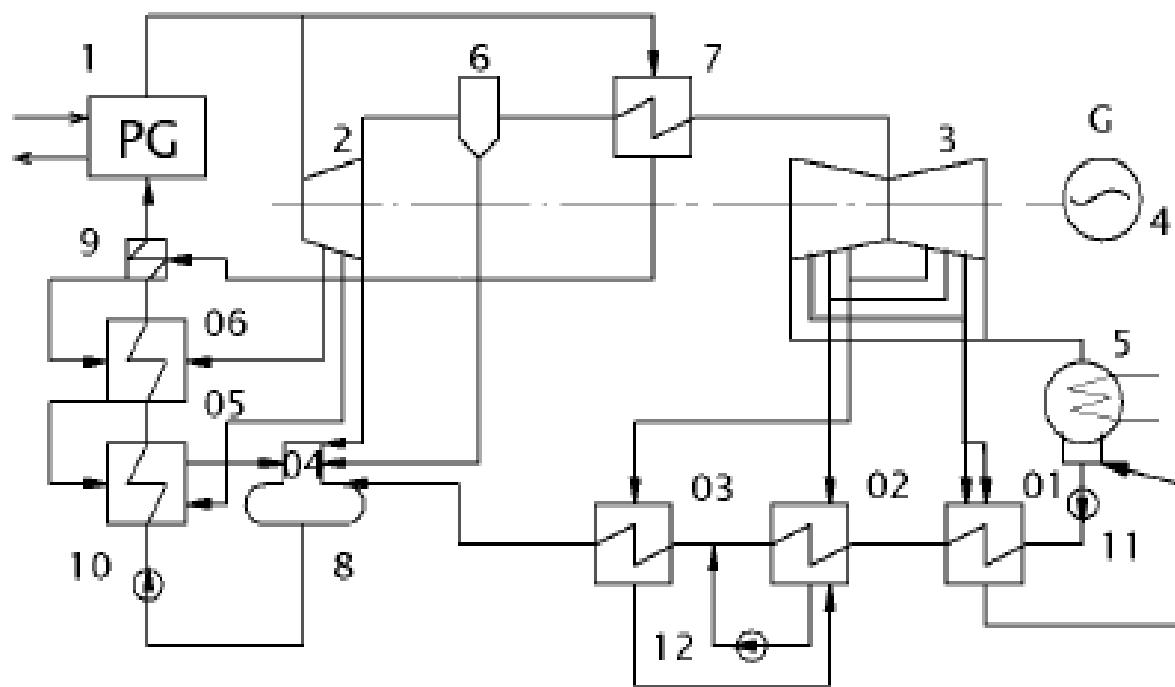
$$P = P_{sv} * \eta_{vs} = [\%] \quad (29)$$

kde: P_{sv} ..je svorkový výkon generátoru [W, MW] (26)

η_{vs} ..je účinnost vlastní spotřeby [-]

$$P = P_{sv} * \eta_{vs} = 1108,68 * 10^6 * (1 - 0,05) = 105324600 \text{ W} = 1053,25 \text{ MW}$$

4.2 Výpočet účinnosti projektu Westinghouse AP1000:



Obrázek 4.2 Tepelné schéma sekundárního okruhu jaderné elektrárny [16]

Máme dáno:

Tepelný výkon reaktoru	$P_{te} = 3400$	[MW]
Výkon parní turbíny	$P_t = 1100$	[MW]
Měrná entalpie na vstupu 1. dílu turbíny	$i_{a1} = 2784,5$	[kJ*kg ⁻¹]
Měrná entalpie napájecí vody	$i_{nv} = 980,6$	[kJ*kg ⁻¹]
Relativní vlastní spotřeba elektrárny	$\varphi_{cv} = 0,05$	[-]
Mechanická a elektrická účinnost turbogenerátoru	$\eta_{me} = 0,983$	[-]
Účinnost parního generátoru	$\eta_{pg} = 0,95$	[-]

Při zanedbání tepelných ztrát v elektrárně určíme množství páry následovně:

$$Q_{mp} = \frac{P_{te}}{i_{pg} - i_{nv}} = [t \cdot h^{-1}] \quad (30)$$

kde: P_{te} je tepelný výkon jaderného reaktoru [W]

i_{pg} je entalpie páry na výstupu z parogenerátoru [$J \cdot kg^{-1}$]

i_{nv} je entalpie napájecí vody [$J \cdot kg^{-1}$]

$$Q_{mp} = \frac{3400 \cdot 10^6}{(2784,5 - 980,6) \cdot 10^3} = 1884,81 \text{ kg} \cdot s^{-1} = 6785,3 \text{ t} \cdot h^{-1}$$

Vnitřní tepelnou účinnost oběhu určíme:

$$\eta_{tsv} = \frac{P_t}{P_{te}} = [-] \quad (31)$$

kde: P_t je výkon parní turbíny [W]

P_{te} je tepelný výkon reaktoru [W]

$$\eta_{tsv} = \frac{P_t}{P_{te}} = \frac{1100}{3400} = 0,3235 = 32,35\%$$

Výkon elektrárny na svorkách elektrického generátoru:

$$P_{sv} = P_t \cdot \eta_{me} = [MW] \quad (32)$$

kde: P_t je výkon parní turbíny [W]

η_{me} je mechanická účinnost turbíny [-]

$$P_e = 1100 \cdot 0,983 = 1081 [MW]$$

Tepelná účinnost oběhu vztažená na svorky elektrického generátoru:

$$\eta_{te} = \eta_{ti} \cdot \eta_{me} = [-] \quad (33)$$

kde: η_{me} je mechanická účinnost turbíny [-]

η_{ti} je vnitřní tepelná účinnost oběhu [-]

$$\eta_{te} = 0,3235 \cdot 0,983 = 0,318 = 31,8\%$$

Celková účinnost jaderné elektrárny bez hodnoty vlastní spotřeby:

$$\eta_{tc} = \eta_{tsv} * \eta_{pg} * \eta_p = [\%] \quad (34)$$

kde: η_{tsv} ..je celková tepelná účinnost oběhu [-]

η_{pg} .. je účinnost parního generátoru [-]

η_p .. je účinnost potrubí [-]

$$\eta_{tc} = \eta_{tsv} * \eta_{pg} * \eta_p = 0,3235 * 0,95 * 0,99 = 0,3141 = 31,41\%$$

Čistý výkon elektrárny:

$$P_n = P_e * (1 - \varphi_{cv}) = [\text{MW}] \quad (35)$$

kde: P_e je výkon elektrárny na svorkách elektrického generátoru [W]

φ_{cv} je relativní vlastní spotřeba [-]

$$P_n = 1081,3 * (1 - 0,05) = 1177,69 * 0,95 = 1027,23 [\text{MW}]$$

Čistá účinnost:

$$\eta_n = \frac{P_n}{P_{te}} = [-] \quad (36)$$

kde: P_{te} je tepelný výkon jaderného reaktoru [W]

P_n je čistý výkon elektrárny [W]

$$\eta_n = \frac{1027,23}{3400} = 0,3021 = 30,21 \%$$

5 Závěr

Stavba nových dvou bloků by měla více než zdvojnásobit výkon Temelína, který v současnosti činí 2000 megawattů. Náklady na stavbu se odhadují na 200 až 300 miliard korun. Nové bloky by měly být uvedeny do provozu v roce 2025.

5.1 Zhodnocení projektu MIR 1200

Evolučně zdokonalený MIR-1200 má klasickou kompozici reaktoru VVER-1000. Jejimi charakteristickými znaky jsou v praxi ověřená řešení:

- nádoba reaktoru je vyrobena z kovaných prstenců z uhlíkové legované oceli, bez podélných svarů,
- reaktory VVER nemají průchodky ve dně reaktoru, ani pod úrovní hrdel vstupu chladiva do reaktoru,
- v projektech jsou použity horizontální parogenerátory s provozně výhodnou značnou rezervou vody, trubky parogenerátoru jsou vyrobeny z nerezové oceli s relativně silnými stěnami,
- skladovací bazén vyhořelého paliva je umístěn uvnitř hermetické obálky budovy reaktoru,
- pokrytí palivových článků je vyrobeno ze zirkoniových slitin s přísadou niobu,
- veškeré zařízení může být přepravováno železniční a automobilovou dopravou,
- jakékoliv zařízení reaktorového bloku, kromě nádoby reaktoru, může být vyměněno v průběhu životnosti bloku při využití dostupných technologií.

Pro zajištění bezpečnosti při projektových haváriích se využívají především aktivní systémy bezpečnosti. V jejich projektových základech, vytvořených na bázi čtyřkanálového principu, jsou zohledněny principy úplného fyzického oddělení, diverzifikace a funkční rezervy. Tyto systémy jsou napájeny elektrickou energií ze zajištěného napájení 2. kategorie z dieselgenerátorů. Pro zvládnutí málo pravděpodobných nadprojektových havárií, včetně tavení aktivní zóny, jsou navrženy systémy, které přednostně využívají pasivní principy odvodu zbytkového tepla z aktivní zóny reaktoru i v případě předpokládané destrukce tlakové nádoby. Pasivní ochranné systémy se v případě potřeby spouští bez účasti operátora jaderné elektrárny. Nevyžadují napájení elektrickou energií, ani součinnost jiných systémů. Pracují pouze s využitím přírodních sil. Nehledě na provedené analýzy, demonstrující možnost zadržení roztavené aktivní zóny v nádobě reaktoru při různých scénářích, jsou v projektu obsažena zařízení pro lokalizaci taveniny

(lapač), rekombinátory vodíku, systémy pasivního odvodu tepla a ochrana hermetické obálky před porušením vnitřním přetlakem. Spolehlivý odvod tepla ve všech režimech je zajištěn:

- Prostředky normálního provozu, důležitými pro bezpečnost, a ochrannými bezpečnostními systémy, které zabezpečují spolehlivý odvod tepla v široké škále havarijních situací.
- Prostředky aktivní bezpečnosti se zajištěným elektrickým napájením zabezpečujícím spolehlivý odvod tepla z reaktoru při projektových haváriích.
- Prostředky pasivní bezpečnosti, zajišťujícími spolehlivý odvod tepla z reaktoru při nadprojektových haváriích s využitím systémů pasivního odvodu tepla z primárního okruhu prostřednictvím parogenerátorů.
- Při nemožnosti využít této cesty jsou aplikovány systémy pasivního odvodu tepla z prostoru hermetické obálky a chlazení zachycené taveniny.
- Pro zvýšení spolehlivosti odvodu tepla a snížení možných vlivů při extrémních podmínkách okolního vzduchu (pro dlouhodobé ochlazování do 72 hodin se využívají pasivní vodní chladicí systémy.
- Pro ochranu radiačně nebezpečného zařízení, pasivních a aktivních systémů odvodu tepla jsou v projektu technická řešení, zajišťující nezbytnou ochranu, bezpečnou odstávku jaderné elektrárny a odvod zbytkového tepla, a to dokonce i v případě pádu těžkého dopravního letadla na budovu kontejnmentu.

Maximální vyhoření paliva palivového souboru je do 70 MWdnů/kg U, což znamená snížení počtu výměn vyhořelých palivových souborů. Při vyhoření paliva do 50 MWdnů/kg U se vyměňuje každoročně 54 vyhořelých palivových souborů z reaktorových bloků VVER-1000. Při zvýšení vyhoření do 70 MWdnů/kg U bude nutné měnit ročně pouze 42 vyhořelých palivových článků. Projektového koeficientu pohotovosti energobloku na úrovni minimálně 90 % se dosahuje i díky zavedení osmiletého cyklu mezi opravami .

5.2 Zhodnocení projektu AP1000 Westinghouse

Výhody spočívají zejména ve vylepšené ekonomické stránce a v pasivních systémech bezpečnosti – i přesto že se stále jedná o tlakovodní reaktor. AP1000 používá pouze ověřené komponenty s prokazatelnými výsledky dosaženými při fungování v tlakovodních reaktorech a dalších jaderných technologiích po celém světě.

Jednou z hlavních výhod je zjednodušený a standardizovaný design, který se dá snadno postavit, snadno se provozuje, udržuje a zároveň je spolehlivý. Obsahuje méně zařízení a menší objekty: například o 50 % méně armatur, žádná bezpečnostní čerpadla, o 80 % méně potrubí, o 85 % méně kabelů. Použití modulů vyráběných v továrnách zkracuje dobu výstavby a zvyšuje kvalitu. To je vidět v současné době na stavbách osmi reaktorů AP1000 v Číně a USA.

AP1000 v sobě má aktivní i pasivní systémy. Aktivní prvky – jako jsou systémy pro řízení chemických parametrů a množství látek nebo odvod zbytkového tepla – podporují běžný provoz a zajišťují první linii obrany pro případ, že dojde k výkyvům stavu elektrárny. Fungují velice podobně jako aktivní systémy používané ve stávajících tlakovodních reaktorech.

Vedle toho má AP1000 také plně pasivní systémy, které ochrání obyvatelstvo v případě, že aktivní ochrana selže nebo že vypadne elektřina. Pasivní systémy elektřinu nepotřebují a využívají přírodní síly, jako je gravitace, vypařování a kondenzace. Po dobu 72 hodin nevyžadují činnost operátorů v případě nějaké neobvyklé události. AP1000 je první a jedinou pasivní elektrárnou, která získala licenci od amerického jaderného dozoru Nuclear Regulatory Commission (NRC).

Základním principem jaderného inženýrství je bariérová ochrana proti úniku radiace. Bariéry jsou tři: obložení palivových článků, vnější chlazení reaktoru a ochranná obálka reaktoru. V málo pravděpodobném případě havárie, kdy by se tavily palivové články, AP1000 druhou a třetí bariéru zachovává. K ochraně dojde zaplavením dutiny reaktoru, namísto využití lapače aktivní zóny, který je projektován tak, aby zachytil aktivní zónu, jež se protaví druhou z bariér – reaktorovou nádobou. Pomocí testů a analýz bylo prokázáno, že tento systém dokáže dostatečně zchladit nádobu reaktoru, a udržet tak aktivní zónu uvnitř. Nádrž s vyhořelým palivem tvoří silné, intenzivně vyztužené betonové zdi a podlaha, lemované ocelí. Při výpadku elektrické energie nemůže z nádrže unikat voda. Reaktor je vybaven několika úrovněmi ochrany pro maximální omezení rizika havárie, díky čemuž je pravděpodobnost poškození aktivní zóny nesmírně nízká a zároveň se minimalizuje možnost zaplavení kontejnmentu, jeho přetlakování a přehřátí.

AP1000 s velkou rezervou splňuje veškerá bezpečnostní kritéria amerického regulátora NRC i veškerá kritéria stanovená pro pravděpodobnost vzniku rizika. Výsledky posouzení pravděpodobnosti vzniku rizika prokázaly velmi nízkou četnost poškození aktivní zóny, která odpovídá 1/100 četnosti poškození této zóny v elektrárnách, které jsou v současné době v provozu, a 1/20 maximální četnosti poškození přijatelné pro novou generaci reaktorů.

Westinghouse Electric Company LLC a Westinghouse Electric Czech Republic tvoří konsorcium firem odpovědných za nabídku společnosti ČEZ na výstavbu bloků 3 a 4 jaderné elektrárny Temelín. Na základě zkušeností Toshiba Corporation, získaných při vývoji a výstavbě AP1000 na různých místech světa, Westinghouse vytvořil tým, který dokáže úspěšně realizovat elektrárnu AP1000 v České republice. Nabídka kombinuje tři klíčové prvky:

- AP1000 je nejbezpečnější jaderná elektrárna s licencí od amerického regulátora,
- nabídka poskytuje nejvyšší jistotu, že elektrárna bude dokončena v souladu s časovým plánem a finančním rozpočtem,
- Westinghouse nabízí širokou spolupráci s českými firmami.

V druhé části mé bakalářské práce jsem zjednodušeně počítal účinnost jaderné elektrárny pro danou modelovou koncepci u projektu MIR 1200 vyšla celková účinnost bez vlastní spotřeby 31,78% a tepelná účinnost oběhu 32,65% a u projektu AP1000 vyšla celková účinnost 31,41% a tepelná účinnost 32,35%.

Hlavní parametry	EPR	AP1000	MIR 1200
Výrobce	Areva	Westinghouse	Rosatom
Účinnost bloku %	37	34	36
Doba životnosti	60	60	60
Doba výstavby v měsících	51	42	54
Využití modulů	Ne	Ano	Ne
Digitální informační systémy	Siemens, Teleperm X	ABB	Siemens, Teleperm X
Kontejnment	dvojitý	jednoduchý	dvojitý
Bezpečnostní systémy	Aktivní čtyř okruhový	Čtyř okruhový, pasivní v tlakovém kontejnmentu	Čtyř okruhový s pasivními prvky
Typ palivového článku	17 x 17 XL	17 x 17 XL	hexagonální
Vyhoření paliva v MWd/kg	62	62	49 VVER 1000, 65 MIR 1200
Parní generátory	4 PG s U trubicemi	2 PG s U trubicemi	4 PG horizontální
Zásah operátora u těžké havárie max.	12 hod	72 hod	24 hod
Bezpečnostní systémy I. okruhu	Aktivní	Pasivní	Pasivní
Bezpečnost kontejnmentu	Pasivní	Pasivní	Pasivní
Pravděpodobnost poškození aktivní zóny	$3,9 \cdot 10^{-7}$	$1,7 \cdot 10^{-7}$	$5,5 \cdot 10^{-8}$

Tabulka 5.1 Zvýšení jaderné bezpečnosti zavedením pasivních systémů

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucí mé bakalářské práce panu prof. Ing. Pavlu Kolatovi, DrSc, za příkladnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc při zpracování mé práce. Dále bych rád poděkoval rodině za umožnění studia.

6 Literatura

- [1] KOLAT, Pavel. Úvod do jaderné energetiky. Úvod do jaderné energetiky [online]. 2012, s. 178 [cit. 2013-03-25]. Dostupné z: <http://www1.vsb.cz/ke/vyuka/JE/JE%20fin.%202012.pdf>
- [2] AP1000 - STEAM AND POWER CONVERSION [online]. [cit. 2013-04-10]. Dostupné z: <https://www.ukap1000application.com/PDFDocs/European%20DCD%20EPS-GW-GL-700%20Rev%201_Public/EPS-GW-GL-700%20Rev%201%20Chapter%2010/EPS-GW-GL-700-Rev%201%20Chapter%2010%20Section%2010-1.pdf>
- [3] MIR -1200, projekt nejen pro Českou republiku [online]. 2010, poslední revize 01/2010 [cit. 2013-04-28]. Dostupné z: <http://www.allforpower.cz/UserFiles/files/2009/skodaJS.pdf>
- [4] ALTSHULLER, A. Saint Petersburg Institute “Atomenergoproekt” [online]. [cit. 2013-04-26]. Dostupné z: <http://www.reak.bme.hu/.../Atomstroyexport_03_SPbAEP_NPP-2006.pdf>
- [5] ERMOLAEV, Vitaly. Atomstroyexport [online]. [cit. 2013-04-28]. Dostupné z: <http://www.atomeromu.hu/download/1675/AES%202006%20reaktor.pdf> -
- [6] You can be sure ... if it's Westinghouse [online]. [cit. 2013-04-14]. Dostupné z: <www.westinghousenuclear.com/docs/AP1000_brochure.pdf>
- [7] AP1000 - Westinghouse Nuclear AP 1000 [online]. [cit. 2013-04-14]. Dostupné z: <https://www.ukap1000application.com/ap1000_at_a_glance.aspx>
- [8] CUMMINS, W.E.; CORLETTI, M.M.; SCHULZ, T.L. Westinghouse AP1000 Advanced Passive Plant [online]. 2003, poslední revize 7.květen 2003 [cit. 2013-04-14]. Dostupné z: <nuclearinfo.net/twiki/pub/Nuclearpower/WebHomeCostOfNuclearPower/AP1000Reactor.pdf>
- [9] Skupina ČEZ [online]. [cit. 2013-05-07]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/cs/uvod.html>

[10] atomstroyexport.com New Clear Energy [online]. [cit. 2013-04-28].
Dostupné z: <http://www.atomstroyexport.com/files/download/mir_eng.pdf>

[11] WESTINGHOUSE [online]. [cit. 2013-05-04].
Dostupné z: <http://www.westinghousenuclear.com>

[12] WAGNER, Vladimír. :: OSEL.CZ :: - Reaktory IV. generace [online]. 2008,
poslední revize 16.květen 2008 [cit. 2013-04-20].
Dostupné z: <http://www.osel.cz/index.php?clanek=3568>

[13] CIESLAR, Stanislav. Westinghouse představil odborné veřejnosti projekt
AP1000 [online]. 2010, poslední revize 23.únor 2010 [cit. 2013-04-21].
Dostupné z: <<http://www.allforpower.cz/clanek/westinghouse-predstavil-odborneverejnosti-projekt-ap1000/>>

[14] Technické provedení JE Temelín | Výroba elektřiny | Skupina ČEZ [online]. [cit.
2013-05-05]. Dostupné z: <<http://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/jadernaenergetika/jaderne-elektrarny-cez/ete/technologie-a-zabezpeceni/8.html>>

[15] VANĚČEK, L. *Výpočet parametrů sekundárního okruhu jaderné elektrárny*: Bakalářská
práce. Brno, Vysoké učení technické v Brně 2011.60s.

[16] PETRIČKO, L. *Koncepcie jadrovej elektrárne tlakovodního typu*. Ostrava:
katedra energetiky, Fakulta strojní VŠB-Technická univerzita Ostrava 2010, 53s, Bakalářská
práce.

Seznam obrázků

Obrázek 1.1 Schéma reaktoru VVER 1000 [1].....	12
Obrázek 1.2 Generace jaderných elektráren z hlediska jaderné bezpečnosti [12]	15
Obrázek 1.3 Přehled světových výrobců jaderných elektráren generace III+ v roce 2013 [12] ..	15
Obrázek 2.1 MIR.1200 [4]	16
Obrázek 2.2 Jaderné elektrárny s technologií VVER [3].....	16
Obrázek 2.3 Uspořádání primárního okruhu MIR 1200 [3].....	19
Obrázek 2.4 Reaktor VVER-1200 [3].....	20
Obrázek 2.5 Kompletní sestava jaderného reaktoru MIR 1200[3]	21
Obrázek 2.6 Příčný řez kontejmentem s lapačem coria MIR 1200 [3]	22
Obrázek 2.7 Parogenerátor PGV-1000MKP [3]	23
Obrázek 2.8 Projekční řešení parogenerátoru [3].....	24
Obrázek 2.9 Kompenzátor objemu [3]	25
Obrázek 2.10 Hlavní cirkulační čerpadlo GCNA-1391 [3]	26
Obrázek 2.11 Schéma bezpečnostních aktivních a pasivních u I. okruhu MIR 1200 [4]	27
Obrázek 2.12 Schéma základních aktivních a pasivních systémů[5].....	28
Obrázek 2.13 Model pasivního odvodu tepla z parogenerátoru a z kontejmentu. [5]	29
Obrázek 2.14 Lapač roztavené aktivní zóny [5]	29
Obrázek 2.15 Katalytický rekombinátor vodíku Škoda JS. [5].....	30
Obrázek 2.16 Zjednodušené schéma I. a II. okruhu včetně technologických okruhů [3]	31
Obrázek 3.1 Schéma jaderného energobloku Westinghouse [6].....	33
Obrázek 3.2 Modulová výstavba v projektu AP 1000 [6].....	34
Obrázek 3.3 Zastavěný objem a plocha u AP1000 a porovnání s menší variantou AP600 [8]	36

Obrázek 3.4 Zjednodušení systémů u technologie AP 1000 [7]	37
Obrázek 3.5 Zjednodušené schéma primárního okruhu AP 1000 [3]	38
Obrázek 3.6 Parogenerátor Delta 125 [6].....	39
Obrázek 3.7 Porovnání parametrů parogenerátorů Delta 125 a PGV-1000M [3,6]	40
Obrázek 3.8 Hlavní cirkulační čerpadlo AP1000 [11]	41
Obrázek 3.9 Srovnání projektů se systémem aktivní a pasivní bezpečnosti [6]	42
Obrázek 3.10 3D model pasivního systému chlazení aktivní zóny a odvodu zbytkového tepla [8]	44
Obrázek 3.11 Umístění pasivního výměníku tepla a havarijní nádrže v kontejmentu a jeho funkce [8]	45
Obrázek 4.1 Schéma sekundárního okruhu jaderné elektrárny [15]	46
Obrázek 4.2 Tepelné schéma sekundárního okruhu jaderné elektrárny [16]	58

Seznam tabulek

Tabulka 2.1 Základní charakteristiky projektu MIR 1200 [3]	18
Tabulka 2.2 Porovnání parametrů tlakových nádob reaktoru [3].....	21
Tabulka 2.3 Porovnání parametrů parogenerátorů [3]	24
Tabulka 3.1 Základní technické parametry jaderné elektrárny AP 1000. [2]	35
Tabulka 5.1 Zvýšení jaderné bezpečnosti zavedením pasivních systémů	65